52 коп.



ВЕРА АЛЕКСАНДРОВНА ЧЕРНОГОРОВА

Вера Александровна после окончания физико-математического факультета университета поступает в аспирантуру, а затем становится научным сотрудником Объединенного института ядерных исследований в городе Дубне.

Почти двенадцать лет она участвовала в экспериментах на ускорителе элементарных частиц — синхроциклотроне. Вера Александровна — соавтор многих научных работ по исследованию свойств мю-мезонов.

В последние годы ею опубликовано более десяти статей в журналах «Знание — сила», «Наука и жизнь», «Техника — молодежи» и других. Тема этих статей — проблемы ядерной физики, физика высоких энергий, астрофизика, управляемый термоядерный синтез, применение достижений науки в практике людей, будущее науки. Многие из этих статей перепечатаны в иностранных журналах.

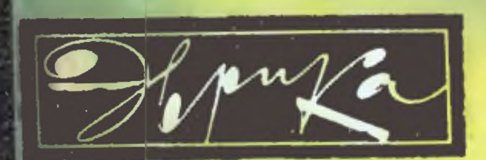
В 1973 году нашим издательством выпущена ее книга «Загадки микромира», в которой рассказывается о некоторых актуальных проблемах физики элементарных частиц. «Беседы об атомном ядре» — вторая книга этого автора, выходящая в серии «Эврика».

МОСКВА, 1976
МОЛОДАЯ ГВАРДИЯ

Эврика



В. ЧЕРНОГОРОВА





В. ЧЕРНОГОРОВА



В. ЧЕРНОГОРОВА

Беседы об атомном ядре

Москва
«Молодая гвардия»
1976

Ч $\frac{70302-236}{078(02)-76}$ 063—76

ОТ АТОМА К ЯДРУ







— Слово «атом» довольно часто встречается в газетах, журналах и книгах, произносится в передачах радио и телевидения, и мы к нему уже привыкли. А вот об атомном ядре слышим гораздо реже. Наверное, эта деталь атома несущественна и интересна лишь для специалистов?

— Отнюдь! В тех случаях, когда говорят «атомная энергия» или «атомные электростанции», смело можно считать, что подразумеваются ядерная энергия и ядерные электростанции.

— Ну а когда поэт называет наш век атомным — это оговорка или результат того, что лирики не знают физики?

— Не совсем так. Непопулярность атомного ядра отражает некий объективный факт.

Колыбелью ядерной физики была атомная физика. В начале нашего века ученые еще не догадывались о существовании ядра и все его проявления приписывали странностям и чудачествам загадочного, как тогда казалось, атома. Английский химик Д. Дальтон в начале XIX века нашел первое научное доказательство атомного строения вещества. Но еще и через сто лет известный австрийский ученый Э. Мах имел некоторые основания саркастически спрашивать у тех, кто верил в атомы: «А вы видели хоть один?»



На протяжении столетия понятие «атом», почти лишенное реального содержания, будоражило воображение и привлекало к себе внимание общественности. На страницах «Войны и мира» Л. Толстого, «Рудина» И. Тургенева, «Истории одного города» М. Салтыкова-Щедрина и других художественных произведений слово «атом», вероятно, встречалось чаще, чем в научных трудах того времени. Понятие же «атомное ядро» не успело еще выйти за пределы научного круга, как уже приобрело полную определенность. Может быть, поэтому оно и оказалось в тени, отбрасываемой огромной популярностью атома.

Сердцевина атома — ядро — не только хранит и отдает всю энергию атома, от нее зависит химическая индивидуальность атома, она задает ритм эволюции гигантских звезд в просторах вселенной.

Но то, что импонировало в понятии «атом» литераторам, заставляло физиков относиться с недоверием к самой сущности мельчайшей структурной единицы вещества. «Искусство удивляется, наука сомневается...» — писал М. Пришвин. И сомневалась она до тех пор, пока три великих открытия, сделанные буквально в течение нескольких последних лет прошлого века, не заставили естествоиспытателей признать существование и делимость атомов.

Знаменитый английский ученый Дж. Дж. Томсон обнаружил электроны — частицы, которые отрывались от атомов под действием электрического напряжения.

Профессор Вюрцбургского университета В. Рентген первым заметил, что в определенных условиях атомы могут испускать мощный электромагнитный сигнал, который впоследствии назвали рентгеновскими лучами. И наконец была обнаружена радиоактивность — явление, непосредственно связанное с атомным ядром. По иронии судьбы это странное качество некоторых веществ поначалу приписывалось атомам. Но в конце концов истина восторжествовала. Исследование невидимого, чрезвычайно проникающего излучения, которое, как это установил французский ученый А. Беккерель, испускала урановая соль, и привело впоследствии к отрытию атомного ядра.

Удивительное это событие в науке — открытие. А еще удивительнее сам процесс выбора того единственного, всегда нового, всегда уникального пути, ко-

торым приходит к нему человек. В самом деле, ну каким образом невидимые лучи из щепотки урановой соли могли навести А. Беккереля на мысль об имеющемся в атоме ядре? Немецкий поэт И. Гёте писал: «...Человек должен верить, что непонятное можно понять, иначе он не стал бы размышлять о нем». Прекрасной иллюстрацией главного таинства науки — перехода от полного незнания о чем-то к знанию — была короткая и бурная история открытия атомного ядра.

Одно из естественных проявлений свойств атомного ядра — радиоактивный распад. Когда ядро распадается, из него вылетают: тяжелые, положительно заряженные частицы — их назвали альфа-частицами; отрицательно заряженные легкие частицы — бета-частицы (электроны); и гамма-лучи, не имеющие заряда. Такое необычное поведение ядер не могло не привлечь внимания ученых. Нашелся человек, который прямо поставил вопрос: «Что происходит с атомами, которые являются источниками радиоактивного излучения?» Этим человеком был будущий отец ядерной физики Э. Резерфорд.

Молодой ученый после окончания Новозеландского университета приехал на стажировку в Англию, в Кавендишскую лабораторию к Дж. Дж. Томсону. В научном багаже будущего директора этой одной из лучших лабораторий мира не было почти ничего, кроме довольно расплывчатой идеи об эволюции химических элементов. Впрочем, это была даже не идея, а нечто вроде научной легенды, уходящей корнями в эпоху алхимии, когда казалось, что нет непреодолимых границ между разными веществами.

К этому времени химики все более и более убеждались, что невозможно один элемент превратить в другой. На основе своих наблюдений они уже в XVIII веке установили закон постоянства элементов, который гласил: «Качество и количество начал (элементов) остаются теми же самыми, происходят лишь перестановки, перемещения».

Этот эмпирический закон подкрепила созданная Д. Менделеевым периодическая система элементов. Идея о превращаемости элементов была как будто выдворена за пределы науки.

Но именно она предопределила научную судьбу Э. Резерфорда. Его чрезвычайно заинтересовала радио-

активность — это только что открытое новое свойство атомов, как тогда думали. Не намек ли это на нестабильность некоторых веществ?

Главную атаку на радиоактивность Э. Резерфорд начинает в Монреальском университете Мак-Гилла, куда его пригласили на должность профессора. Двадцатисемилетний ученый трудится как одержимый. «Я постоянно торчу в лаборатории, — пишет он своей невесте, — из семи вечеров провожу там пять и, как правило, довожу дело до конца; в прошлый четверг я послал еще одну большую статью в журнал... в ней тысяча новых фактов, о которых никто даже не подозревает». И столько же новых мыслей зреет у него в голове.

К изучению радиоактивности он привлекает лучших сотрудников университета. С ним начинает работать инженер-электрик Р. Оуэнс, который сообщил Э. Резерфорду, что, экспериментируя с радиоактивным торием, он обнаружил «нечто», что не было ни торием, ни альфа-, ни бета-лучами, но улетало, если на него подуть».

Через некоторое время Э. Резерфорд доказал, что таинственное «нечто», обнаруженное Р. Оуэнсом, — газообразный химический элемент радон, возникающий при распаде атомов тория.

В запаянном сосуде, содержащем радиоактивный элемент радон, ученый через некоторое время нашел другой химический элемент, инертный газ — гелий. Вывод ясен — радиоактивное вещество, распадаясь, изменяется.

В итоге десятилетней упорной и трудоемкой работы, которая не походила на работу только физика или только химика и в то же время была и работой физика, и работой химика, Э. Резерфорд находит экспериментальное подтверждение гипотезы о превращаемости элементов.

Вместе с молодым талантливым химиком Ф. Содди он обнаружил три «генеалогических древа» радиоактивных превращений урана, тория и актиния. Три самых тяжелых элемента периодической системы оказались родоначальниками радиоактивных семейств, каждое из которых в результате последовательных превращений его членов заканчивалось одним и тем же более легким стабильным элементом — свинцом.

Э. Резерфорд и Ф. Содди представили научной общественности убедительные факты, из которых следовало, что радиоактивность — это проявление внутренних изменений атомов.

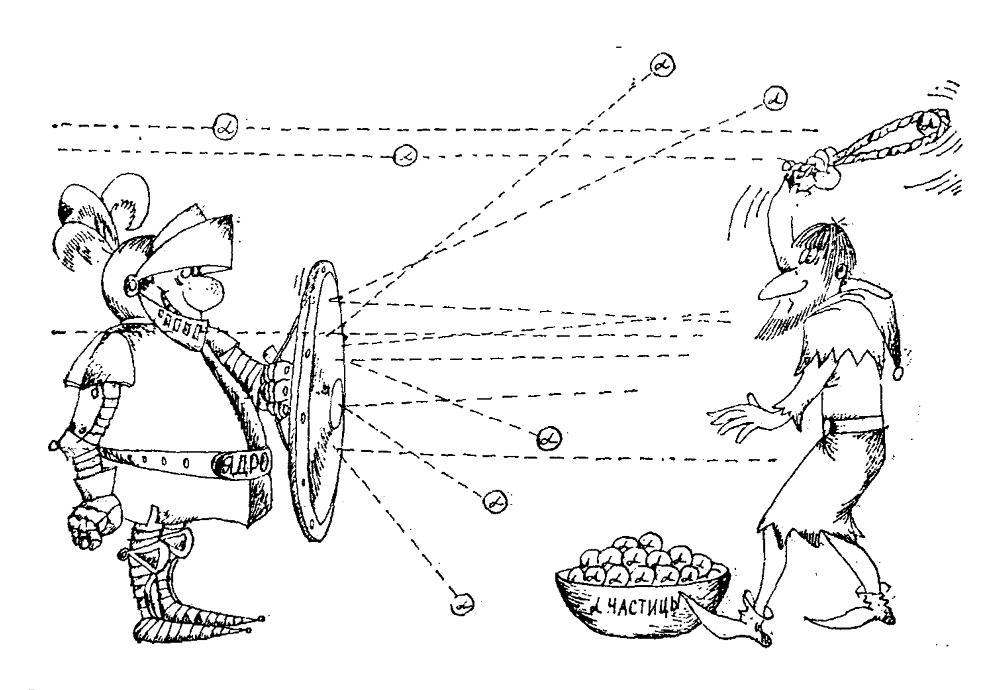
— Ну и что? Разве из одного-единственного факта изменения атомов следовало, что у них есть ядра?

— Конечно, нет. Даже если бы Э. Резерфорд обладал способностями талантливого детектива, он и тогда не догадался бы еще, что все дело в атомном ядре.

Иногда на нетерпеливые расспросы своего друга Уотсона Шерлок Холмс отвечал, что не может пока делать каких бы то ни было предположений, так как не располагает достаточным количеством необходимых фактов.

Фактами, которые могли бы навести на мысль о существовании в атоме ядра, не располагал и Э. Резерфорд. Он знал одно: атомы некоторых веществ могут самопроизвольно изменяться. Но даже этот скромный вывод находился в резком противоречии с убеждением естествоиспытателей о неизменности атомов.

В то время казалось, что периодическая система элементов навечно закрепила положение каждого из них в своей клетке в соответствии с атомным весом. Ну как тут можно было усомниться в главных устоях



периодического закона: в неделимости атома, в неизменности его массы и в непревращаемости химических элементов.

От сторонников подобных взглядов Э. Резерфорд вынужден был выслушивать намеки на то, что его радикальные идеи о нестабильности материальных атомов могут бросить тень на весь университет.

Но большинство коллег поддержали смелого ученого, и он получил возможность продолжать свои исследования радиоактивности.

Справедливо говорят, что правильно поставленный вопрос содержит в себе половину ответа. Сказанное целиком и полностью относится и к новому вопросу, на который теперь ищет ответа Э. Резерфорд.

Почему, пытается понять он, бета-распад, при котором вылетает электрон, необратимо меняет физические и химические свойства радиоактивного атома, а отрыв точно такого же электрона от стабильного атома, например при электрическом разряде в газе, ничего не меняет? Стабильный атом лишь на короткое время превращается в положительно заряженный ион.

Сам того не ведая, Э. Резерфорд уже четко отделил атомное явление — ионизацию (потерю электрона с внешней электронной оболочки) — от ядерного — испускания электрона при радиоактивном превращении атомного ядра. Теперь исследователю предстояло сделать только один шаг. Но куда? Э. Резерфорд должен был поставить такой эксперимент, который дал бы однозначный ответ на все мучившие его вопросы. Но как догадаться, какой именно эксперимент?

Никакой теории практически не существовало, ничто не освещало ему дорогу. Модель Дж. Дж. Томсона, в которой атомы воображались в виде положительно заряженной сферы, заполненной электронами, вела, как чувствовал Э. Резерфорд, в какой-то тупик. Его мысль металась в замкнутом пространстве, не находя для себя никакой опоры.

А результаты экспериментов не давали покоя. Он должен, он обязан был выяснить, откуда в момент радиоактивного распада появляются альфа-частицы, в восемь с лишним тысяч раз более тяжелые, чем электроны?

Увлеченный разрешением всех этих проблем, Э. Резерфорд, уже известный мировой научной общественно-

сти сорокалетний профессор, получает в свое полное распоряжение большую физическую лабораторию в Манчестерском университете. Здесь сразу же возникла атмосфера творческого подъема.

Казалось, сам воздух в лаборатории был насыщен ожиданием чего-то необычного.

Это и понятно. Интуиция не изменила Э. Резерфорду. Шеф лаборатории впервые поставил эксперименты, цель которых состояла не в изучении собственно радиоактивных веществ, а в наблюдении взаимодействия альфа-лучей с тонкими пленками разных веществ.

Дни владычества атомной модели Дж. Дж. Томсона были сочтены.

Неожиданный и интересный поворот в работе заинтересовал всех сотрудников лаборатории. «Молодые люди быстро почувствовали, что пошли навстречу славным дням», — вспоминал потом один из ближайших помощников Э. Резерфорда, Г. Гейгер.

И они наступили, эти славные дни, но не раньше того, как за них сполна было заплачено тяжким трудом. Более миллиона вспышек от альфа-частиц подсчитали коллеги Э. Резерфорда собственными глазами на фосфоресцирующем экране. И результат воздал за все сторицей.

Почти все альфа-частицы беспрепятственно пролетали через тонкие пленки, едва заметно отклоняясь в ту или иную сторону от центра экрана. Так и должно было быть, если атом в самом деле начинен только легкими электронами. Но удивительным было поведение незначительной части этих микроснарядов. Иногда вспышки от них появлялись и на краю экрана. Так сильно отклонить альфа-частицы могло только тело с большим зарядом и массой, значительно большей, чем у электрона. Что же встречали на пути те редкие альфа-частицы, которые отскакивали от пленки почти назад?

Сразу можно было сказать, что в атомах есть что-то и посущественнее электронов. Э. Резерфорд уже не сомневался в том, что положительный электрический заряд и масса атома сконцентрированы в его середине, в ядре.

Представление о размерах ядра можно было получить из тех же экспериментов с альфа-частицами. По вероятности столкновения их с тяжелыми сердце-

винами атомов физики нашли ту область, которую занимало атомное ядро. Размеры ее оказались порядка 10^{-13} сантиметра, тогда как размеры всего атома 10^{-8} сантиметра.

Огромный зал университетской аудитории и крошечная булавочная головка в центре — в такой пропорции находились размеры атома и атомного ядра.

Итак, ядерная физика родилась.

Открытие ядра сразу заменило старую, атомную, вывеску радиоактивности на новую — ядерную. И на все вопросы, связанные с радиоактивным излучением, должна была ответить ядерная физика.

— А что еще тут было отвечать? Ведь сразу стало понятно, что неустойчивые (нестабильные) ядра распадаются, а устойчивые (стабильные) остаются сами собой. Вот и все.

— Нет, далеко не все. Открытие атомного ядра вовсе не дало ответа на все вопросы, связанные с радиоактивностью.

— Что же именно осталось непонятным?

— Совершенно таинственной казалась природа источника энергии в этом процессе. Что заставляло альфа- и бета-частицы вылетать из ядра с огромной скоростью?

Эксперименты с рентгеновскими лучами, например, никогда не вызывали никаких волнений ни у физиков, ни у широкой публики по поводу того, откуда это излучение черпает энергию.

К рентгеновской трубке подключали электрическое напряжение, и электрическая энергия переходила в энергию электромагнитного излучения. Все было просто и понятно.

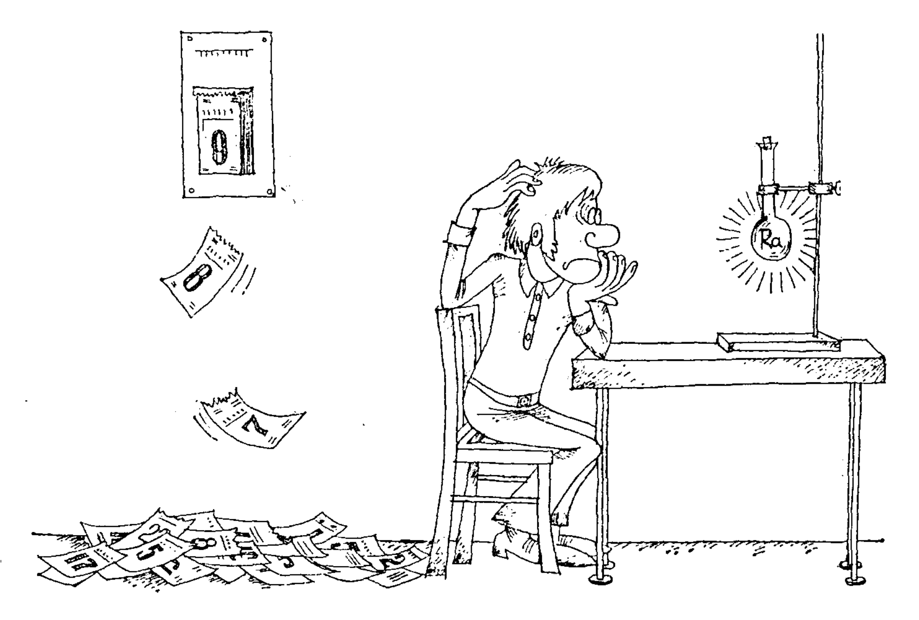
Но к радиоактивному урану ничего не подключали, а он «работал». И А. Беккерель, едва справившись с волнением по поводу открытия радиоактивности, вторично был потрясен тем, что интенсивность излучения соли урана заметно не изменялась в течение нескольких дней и даже месяцев.

Химический элемент радий бесконечно долго светился в стеклянной трубочке, нагревал ее стенки и исправно, изо дня в день, ионизировал вокруг себя воздух, заставляя спадаться листочки стоящего рядом электроскопа. Подобное чудо часто демонстрировалось на публичных лекциях о радиоактивности.

Поразительное зрелище! Энергия возникала из кусочка инертного вещества. Мозг отказывался воспринимать то, что видели глаза.

Случай был беспрецедентный. Люди, далекие от науки, объявили эту невесть откуда сочившуюся энергию неисповедимой тайной природы. А что говорили ученые?

Физики знали, что чудес не бывает, но сказать что-либо более определенное они пока не могли. А. Беккерель черным по белому писал в 1903 году, что «источ-



ник, из которого они (радиоактивные тела. — *Авт.*) черпают испускаемую энергию, нам неизвестен».

Источник энергии неизвестен — тяжелое признание для физика.

Человечество на протяжении долгих столетий всегда убеждалось в том, что энергия никогда не исчезает и не возникает из ничего, а лишь переходит из одной формы в другую. И вдруг веками выстраданное знание оказалось бесполезным. Это грозило катастрофой всему зданию науки.

Один из крупнейших ученых того времени А. Пуанкаре прямо говорил, что «радий подрывает принцип сохранения энергии». Часто, как заклинание, повторяли: «Если масса вещества превращается в энергию, значит масса не сохраняется». А когда вспомнили, что массу,

как это было принято со времен И. Ньютона, можно отождествить с понятием материи, стало совсем страшно. Не умея открыть дверь, ведущую к разгадке тайны энергии радиоактивных веществ, некоторые ученые потеряли всякий ориентир. Но вместо того чтобы кричать «ау», как это делают заблудившиеся, они возопили: «Материя исчезла!»

Другие ученые (например, известный физикохимик В. Оствальд) использовали открытие радиоактивности для обоснования давно вывешенного ими философского лозунга, который гласил, что понятие материи надо отбросить как «ненужное умственное построение», что «мир состоит исключительно из энергетического материала».

Решение конкретных физических проблем задевало самые основы философии, и среди философов разгорелся жаркий спор.

В этот момент небывалого по своей остроте столкновения идей вышла книга В. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм». В. Ленин писал: «Материя исчезает» — это значит исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идет глубже; исчезают такие свойства материи, которые казались раньше абсолютными, неизменными, первоначальными (непроницаемость, инерция, масса и т. п.) и которые теперь обнаруживаются, как относительные, присущие только некоторым состояниям материи. Ибо *единственное* «свойство» материи, с признанием которого связан философский материализм, есть свойство *быть объективной реальностью,* существовать вне нашего сознания».

Дальнейшее развитие физики подтвердило правоту этих замечательных слов великого материалиста и диалектика.

При радиоактивном распаде материя не исчезала, закон сохранения энергии не нарушался, а радиоактивное излучение действительно черпало энергию, запасенную ранее в недрах атомных ядер.

Естествоиспытатели подготовили основы для этого важного вывода. Пока обыватели ошарашенно глядели на пробирку с радием и скребли в затылке, ученые, после некоторого замешательства, энергично засучив рукава, принялись за дело.

Известный французский ученый П. Кюри поместил

эту злополучную трубочку, содержащую радий, в специальный сосуд с водой — калориметр, чтобы оценить количество энергии, выделяемой при радиоактивном распаде вещества.

В воде поглощались почти все вылетающие из препарата альфа-частицы, электроны и гамма-лучи, и ее температура повышалась.

По степени нагревания воды П. Кюри установил, что один атом радия, превращаясь в радон, выделял в миллион раз больше энергии, чем можно было получить при образовании молекулы воды из двух атомов водорода и одного атома кислорода. А эта химическая реакция славилась своей высокой отдачей энергии.

Радиоактивные вещества представлялись чем-то вроде хранилищ, наполненных величайшей драгоценностью — энергией, которую с большим трудом добывали люди, сжигая извлекаемое из-под земли топливо.

Физики видели, что нет принципиальной разницы между обычными веществами и радиоактивными. По их мнению, атомы всех химических элементов должны были иметь большие запасы энергии. Но только радиоактивный распад атомов давал возможность обнаружить эти запасы, часть которых уносили альфа-частицы, электроны и гамма-лучи.

Осознание того, что вот тут, под рукой, кругом есть энергия, которую, может быть, удастся использовать в будущем, радовало и восхищало.

В то же время некоторые ученые уже задумывались об опасности, которую таит в себе это будущее. Выдержит ли человечество предстоящее ему испытание? Во зло обратит оно свое могущество или с его помощью ускорит развитие цивилизации?

Но мало кто заглядывал так далеко вперед. Пока проблема внутриядерной энергии имела чисто фундаментальное значение и большинство ученых заботило совсем иное: как докопаться до самой сути, узнать, каково назначение энергии, запертой в веществе, и когда возник там этот запас?

Не теряя веры в закон сохранения энергии, надеялись и здесь вскрыть привычный ее круговорот. Все эти благие пожелания так и остались бы пожеланиями, если б не помогла удивительная история, связанная с атомным весом.

— Атомный вес? Что в нем может быть интересного? При распаде ядра по крайней мере что-то происходит — вылетают частицы, выделяется энергия. А что может приключиться с атомным весом?

— Представьте себе, атомный вес поведал физикам немало ценных сведений о микромире. Особенно когда они нежданно-негаданно оказались в роли ревизоров.

— ?!

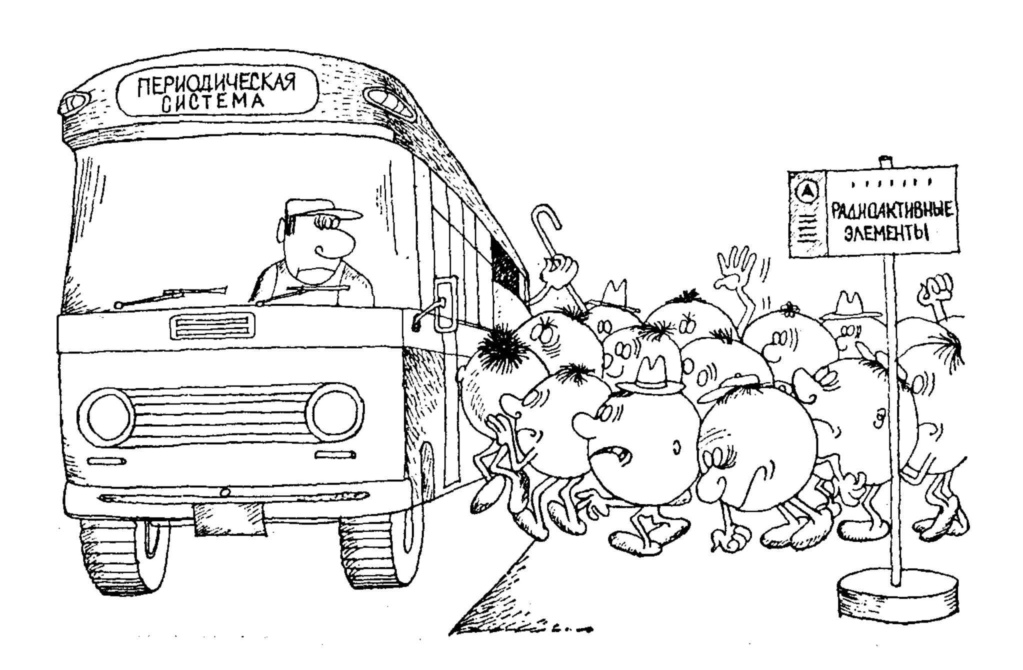
— Да, да, физикам-ревизорам однажды крупно повезло. Они вскрыли недостачу в атомном весе.

Чтобы понять, как удалось им это сделать, обратимся к... философии. Люди всегда жаждали узнать, из чего состоит мир.

Двадцать с лишним веков назад на эту тему можно было только философствовать. Так и поступали. Демокрит, которого, по-видимому, больше интересовала, так сказать, структура всего сущего, изрек однажды: «Мир состоит из атомов».

А современник Демокрита Эмпедокл подходил к этой проблеме с другой стороны. Он искал элементы, общие для всей природы, и нашел, что миром владеют четыре стихии: земля, огонь, вода и воздух.

От философов не требовали и не требуют доказательств. Поэтому известному последователю школы



Эмпедокла Аристотелю не стоило большого напряжения утверждение о том, что материя состоит из одного первичного вещества — «протила». Все равно никто не знал, что это такое, в том числе и сам философ.

Но в начале XIX века английский врач и химик У. Праут как будто догадался, что представляет собой «протил». Учение Демокрита и предположение Аристотеля в гипотезе У. Праута гармонично слились в идею о материальном единстве мира.

Мир построен из атомов, а атомы всех химических элементов построены из одних и тех же стандартных деталей — из атомов водорода. Водород — вот он, «протил» древних, — полагал У. Праут.

Однако XIX век отличался от века, в котором жили древние мыслители, гораздо большей недоверчивостью. Одного утверждения людям было мало, требовались и доказательства. Если гипотеза У. Праута соответствовала действительности, то атомные веса элементов должны были быть целыми, кратными атомному весу водорода.

Но беда в том, что тогда еще не умели взвешивать атомы. А гипотеза была заманчива, ее стоило проверить. Первую попытку сделал упоминавшийся нами Д. Дальтон. Косвенно, из расчета количества участвующих в химической реакции веществ, он нашел атомные веса нескольких элементов. И... У. Праут потерпел поражение. Атомные веса имели дробные значения. Последующие уточнения не изменили сложившейся ситуации.

Гипотеза о типовом принципе строения вселенной из водорода пролежала в забвении почти сто лет, пока атомным весом не заинтересовались физики.

В это время они беспечно занимались изучением радиоактивности. С удовлетворением наблюдали, как при радиоактивном превращении атомов одних элементов возникали атомы новых химических элементов, подчас тоже радиоактивные. Не успевая придумывать новые названия, они на ходу развешивали временные этикетки вроде: радий-А или торий-С″. Когда же пришла пора на основе химических свойств точно определить место каждого из этих элементов в периодической таблице, вышел конфуз. Некоторые из тех веществ, которые физики легко различали по атомному весу и разным типам радиоактивного распада, химики, к сво-

ему ужасу, должны были признать одинаковыми: химические свойства этих веществ были совершенно идентичны. Куда их помещать? Подходящих свободных клеточек оставалось совсем немного.

До сих пор именно атомный вес был главным распорядителем в периодической системе элементов. Каждый элемент водворялся на место в строгом соответствии со своей массой: легкие — в начало, тяжелые — в конец.

Теперь же несколько десятков новых тяжелых радиоактивных элементов претендовали всего лишь на несколько свободных мест.

Неслыханное дело! Конкурс в таблице элементов! Но элементы не абитуриенты, а таблица — не университет, который не может принять всех желающих. Но если она претендовала на универсальность, то должна была предоставить место всем элементам, сколько бы их вдруг ни нахлынуло!

Наконец, бывший сотрудник Э. Резерфорда по Канадскому университету Ф. Содди высказал предположение, что в природе, по-видимому, существуют разновидности химических элементов с разными атомными весами и несколько отличающимися физическими свойствами, и разновидности эти должны занимать одно и то же место в периодической системе.

Последнее обстоятельство и было отражено в том названии, которое они получили: «изотопы» (от греческих слов «изос» — «одинаковый» и «топос» — «место»).

Открытие изотопов у тяжелых, а вскоре и у легких элементов заставило, в свою очередь, схватиться за голову физиков. Ведь атомные веса измерялись косвенно, с помощью химических реакций, в которых изотопы элементов неразличимы. Не оставалось никаких иллюзий относительно того, что химическими методами никогда не удалось бы узнать вес каждого изотопа, и физики решили сами заняться точным взвешиванием атомов с помощью специально для этой цели созданного прибора, масс-спектрографа. Истинный атомный вес изотопа можно было найти только одним путем — путем взвешивания каждого отдельного атома. Метод взвешивания таков. Сначала свободные атомы химического элемента превращают в ионы. Затем их ускоряют и направляют в специальную камеру, из которой предварительно выкачивают воздух. В вакуумной камере под действием магнитного поля ионы двигаются по орби-

там с радиусом, соответствующим массе этих частиц. И если взвешиваемые атомы состоят из смеси изотопов, то на фотопластинке, поставленной на их пути, можно наблюдать почернения в тех местах, где на нее попадают частицы разной массы. Количество пятнышек соответствует числу изотопов. Абсолютный же вес атомов каждого изотопа можно найти, зная положение соответствующего пятнышка на фотопластинке.

Первые же полученные результаты окончательно рассеяли почти вековое заблуждение. Те дробные значения, которые раньше принимали за атомный вес элементов, на самом деле были средними арифметическими атомных весов всех изотопов этих элементов.

Взвешивание атомов подтвердило гипотезу У. Праута. Атомный вес каждого изотопа оказался кратным атомному весу водорода.

Все как будто складывалось к лучшему: нашли изотопы, исправили атомные веса, наконец, обнаружили атомное ядро.

Подобно герою пьесы «Мещанин во дворянстве», который удивился, узнав, что всю жизнь говорил прозой, физики тоже испытали чувство приятного удивления, когда узнали, что уже целый век толкуют о ядерном весе. Ведь масса атомных электронов ничтожно мала.

Атомный вес, прежде полновластный распорядитель в периодической системе, полностью утратил свой авторитет после появления нового кумира — атомного ядра. Порядковый номер элементов точно совпадал с величиной электрического заряда ядер и был одинаков у всех изотопов каждого элемента.

Физики были счастливы, но недолго. Любознательность непреодолима и не признает никаких границ. Захотелось поточнее измерить ядерный вес, и как только Р. Астон, ближайший сотрудник Э. Резерфорда в Манчестерском университете, закончил работу по усовершенствованию своего масс-спектрографа, началась новая ревизия. Тут-то и обнаружилась недостача.

Массы атомных ядер совсем немного, всего лишь на несколько десятых и даже сотых долей процента от массы водорода, недотягивали до ближайшего целого числа.

Экспериментаторы только развели руками. В их глазах атомные ядра теперь выглядели не только хранителями огромных запасов энергии, но и расточителями собственной массы.

— Кража в микромире? Феноменально! Что же показало расследование?

— Объяснить, с чем связана крошечная потеря в атомном весе, было для физиков намного труднее, чем следователю найти самого хитрого расхитителя.

— В мире атомов и ядер все непросто. Догадываюсь, что там два плюс два не совсем четыре и обычная математика не годится.

— Виноватой оказалась не арифметика, а основы мироздания. Недостающие ничтожно малые доли грамма, так называемый «дефект масс», как выяснилось с помощью специальной теории относительности, были математически точной мерой энергии радиоактивного излучения.

Ученые, увлеченные исследованиями атомных ядер, не сразу догадались, что необходимые для следствия материалы уже несколько лет назад найдены специальной теорией относительности, которая вверх дном перевернула все представления о пространстве, времени, материи и движении. Не следует, однако, думать, что крупнейшие теоретики в начале нашего века ставили перед собой именно такую задачу: расчистить дорогу, ведущую к познанию микромира.

В то время еще не было видно ни самой этой дороги, ни препятствий, которые необходимо было устранить. Об атомном ядре пока ничего не знали. Известно было лишь одно: атомы имеют сложную структуру. Ведь они содержали электроны, а при радиоактивном распаде испускали альфа-, бета- и гамма-лучи.

Экспериментаторы и занимались в основном изучением свойств радиоактивных веществ и только-только начали поставлять материал теоретикам для размышлений. Окно в микромир было едва приоткрыто.

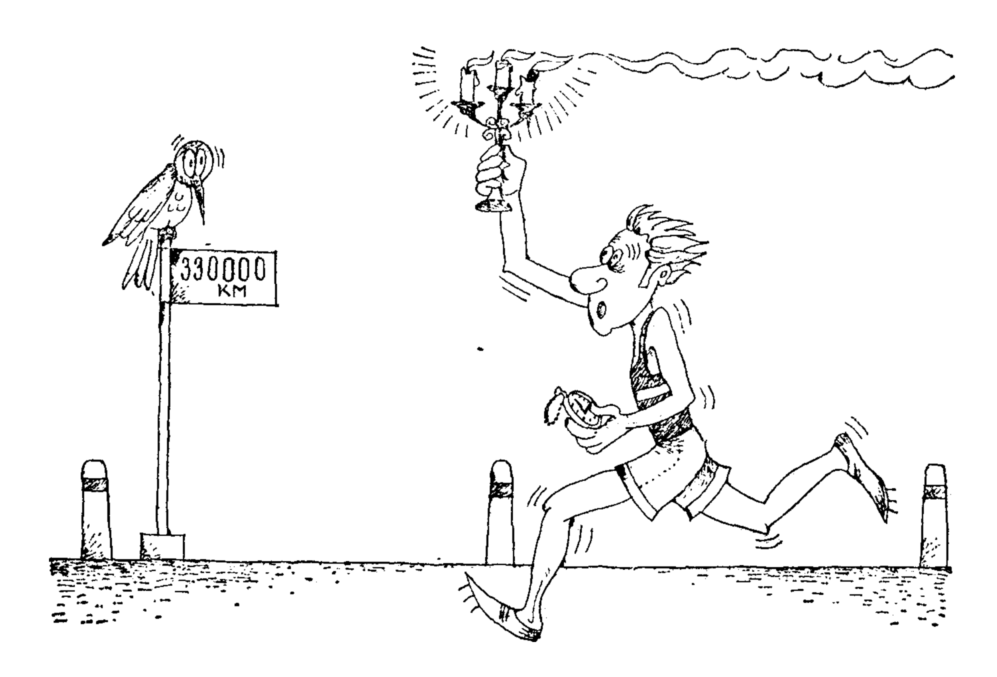
И тем не менее в первые годы XX века был разоблачен и решительно отброшен тот поверхностный подход к основным взаимосвязям в природе, что царил в физике несколько столетий. Наука сформулировала новые, более глубокие основы, на которых затем выросла физика атомного ядра и элементарных частиц. Как же это могло произойти?

Обычно пересмотр старых понятий происходит в тот

момент, когда они приходят в противоречие с новыми экспериментальными фактами.

У физиков, пытавшихся разобраться в строении вещества, имелось тогда в руках одно необычное открытие — радиоактивный распад атомов. Но явление радиоактивности оказалось настолько непонятным, что невозможно было установить, в чем же конкретно выражалось его несоответствие сложившейся картине мира.

«Не было счастья, да несчастье помогло», — утверждает пословица. Был еще один факт, который, безусловно, противоречил механике И. Ньютона. Такие известные ученые, как Г. Лоренц, А. Пуанкаре, П. Ланжевен и другие, пытались в это время примирить классическую физику с обнаруженным экспериментаторами странным свойством света. Его скорость совершенно не зависела от движения источника, испускающего свет. Приближался ли источник света или удалялся от приемника, свет приходил к нему всегда с одинаковой скоростью. Для него не существовало правила сложения скоростей!



Этот единственный непонятный факт в микромире, до сих пор послушном законам классической физики, чрезвычайно тревожил ученых, и они прилагали огромные усилия, чтобы приспособить его к основам механики И. Ньютона.

А на самом-то деле необычное свойство света вскрыло неблагополучие в фундаменте, казалось, полностью завершенного здания физики; неблагополучие, связанное с ограниченным толкованием понятий пространства, времени, материи и движения, то есть всех тех понятий, соотношения между которыми особенно выпукло проявились потом в микромире.

Заинтересовался этой проблемой и молодой А. Эйнштейн, который после окончания Цюрихской технической школы работал в швейцарском бюро патентов в должности эксперта.

Кроме близких друзей, никто и не знал, что молодой эксперт в свободные от службы часы вел напряженную научную работу. Его начальник и не догадывался, кто занимается у него оформлением патентных свидетельств. Когда будущий лауреат Нобелевской премии вручил ему заявление об уходе с работы и объяснил, что приглашен на должность профессора в Цюрихский университет, последовала бурная реакция: «Это неправда, господин Эйнштейн. Я вам не верю. Это очень глупая шутка».

Ученый, получивший результаты, без которых невозможно было построить ни один ускоритель, невозможно было ни оценить запасы атомной энергии, ни рассчитать энергетический баланс ядерных реакций, не занимался, как Э. Резерфорд, исследованием радиоактивности или поисками атомного ядра и не открыл ни одной элементарной частицы. Вся его лаборатория, все его орудия труда легко умещались в кармане. Это был карандаш, к помощи которого он прибегал, чтобы сделать необходимые расчеты.

А. Эйнштейн первым понял, что именно тянет за собой факт «неповиновения» скорости света обычным правилам классической физики. Он показал, что этот факт вместе с математическими формулами, с помощью которых хотели ликвидировать расхождение между ним и механикой Ньютона, необходимо положить в основание новой теории — специальной теории относительности. А старые правила считать приближенными и справедливыми только для объектов, движущихся со скоростью, намного меньшей скорости света.

Специальная теория относительности утверждала,

что чем быстрее движется тело, тем сильнее оно сопротивляется движению, увеличивая массу. Заметить эту необычную метаморфозу можно было только при одном чрезвычайно жестком и практически, как тогда казалось, невыполнимом условии: тело должно было двигаться со скоростью, близкой к скорости света.

Новая теория была создана как будто «по заказу» микромира, хотя и несколько раньше, чем он поступил. На Земле просто не были известны объекты, движущиеся со столь высокими скоростями. И это дало повод Э. Резерфорду отметить как-то, что недостаток теории относительности заключается, по его мнению, в чрезмерной абстрактности этой теории и оторванности ее от действительности.

На самом же деле предсказанное теорией изменение массы тела, движущегося с околосветовой скоростью, уже наблюдал знаменитый Дж. Дж. Томсон. Обнаружив электрон в разрядной трубке, он измерил его массу и понял, что быстродвижущийся электрон тяжелее покоящегося.

Наконец, спустя шесть лет Э. Резерфорд обнаружил атомное ядро и раскрыл окно в микрокосмос, населенный частицами-лихачами, обладающими огромными энергиями, — мир, совершенно неподвластный законам классической физики.

Микромир стал великолепной ареной, на которой теории относительности удалось продемонстрировать все свою глубину и всеобъемлемость.

Ни в макромире, ни в мире атомных ядер и элементарных частиц нет ничего выходящего за пределы четырех основных понятий: «пространство», «время», «материя» и «движение».

Основатели диалектического материализма К. Маркс и Ф. Энгельс еще задолго до создания теории относительности утверждали, что если время и пространство суть формы существования материи, то они должны быть теснейшим образом связаны с нею и между собой, и что непременно должна обнаружиться взаимозависимость между материей и движением.

Но тогдашняя наука о природе не давала никаких реальных подтверждений этим философским принципам. Ни один эксперимент не нарушал наивного мнения, что пространство — это «пустое вместилище, наполненное материальными телами». Ничто не мешало

и вере в некое абсолютное время, не зависящее от свойств материи.

Теория относительности впервые в истории науки показала, как тесно на самом деле переплетены свойства пространства и времени.

Вскоре после того, как в журнале «Анналы физики» была напечатана статья А. Эйнштейна по специальной теории относительности, он в письме своему другу высказал очень важное соображение, что масса тела должна быть непосредственной мерой заключенной в нем энергии.

В то время уже были известны результаты тончайших экспериментов, с удивительным мастерством поставленных выдающимся русским физиком П. Лебедевым. Он доказал, что свет оказывает давление на поверхность предметов.

«Свет переносит массу, — писал А. Эйнштейн. — Заметное убывание массы должно было бы наблюдаться у радия. Такие соображения веселят и подкупают; но не потешается ли господь бог и не водит ли он меня за нос — этого я не могу знать». Шутливое опасение А. Эйнштейна не оправдалось. А свои мысли о взаимосвязи между массой и энергией он сформулировал на трех печатных страницах и опубликовал спустя несколько месяцев в том же журнале. «Зависит ли инерция тела от содержания в нем энергии?» На этот вопрос, вынесенный в заголовок, статья отвечала утвердительно.

Новые представления о пространстве и времени позволили А. Эйнштейну доказать общее положение о тесной взаимосвязи между массой — мерой инертности тел, и энергией — мерой количества их движения. Исследования микромира подтвердили выводы теории.

Навсегда была засыпана казавшаяся раньше ученым непреодолимой пропасть между материей и движением; пропасть, существование которой никогда не признавалось творцами философии диалектического материализма.

А. Эйнштейн показал, что приращение массы движущегося тела связано с увеличением его кинетической энергии. Масса неподвижного тела, так называемая масса покоя, связана с полным запасом «внутренней» энергии покоящегося тела. А запас этот состоит из энергии молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц.

Формула А. Эйнштейна $E = mc^2$ говорила о том, что при изменении массы энергия изменяется в том же направлении, но с огромным коэффициентом пропорциональности «с», равным скорости света $3 \cdot 10^{10}$ сантиметров в секунду, возведенным в квадрат. Причем, энергия измеряется в джоулях, а масса — в граммах.

Практически невозможно обнаружить изменение массы покоя, например, у реагирующих веществ в химических реакциях, так как слишком мала порция выделяющейся энергии. «Не исключена возможность, — писал он, — что проверка теории удастся для тел, у которых содержание энергии в высшей степени изменчиво... например, у солей радия».

Гениальный ученый попал в точку! Так заранее был подготовлен тот необходимый материал, без которого никак не могло завершиться дело о «дефекте масс», а вместе с ним и решение проблемы внутриядерной энергии.

Вот где соприкоснулись две такие разные линии развития науки: непосредственное экспериментальное исследование радиоактивности и теоретическое проникновение в глубочайшие свойства пространства и времени. Они сблизились, и это дало возможность в дальнейшем широко распахнуть дверь, ведущую к познанию свойств атомного ядра.

А. Эйнштейн говорил впоследствии: «Я сосредоточил свои усилия на отвлеченной теории, в то время как Резерфорд сумел достичь глубоких познаний путем довольно простых размышлений и использования сравнительно несложных экспериментальных средств».

Э. Резерфорд и А. Эйнштейн выполнили самую первую необходимую работу для проникновения в микромир.

В сторону были сдвинуты такие колоссы, как ньютоновские представления о пространстве и времени, закон неизменности массы тел.

Знаменитая формула А. Эйнштейна заставила всех по-иному посмотреть на радиоактивный распад. Не надо было тщиться рассмотреть его сразу с двух отдельных вершин: закона сохранения энергии и закона сохранения массы. Достаточно было взойти на одну-единственную, но гораздо более высокую и удобную для обозрения вершину под названием «единый», или «обобщенный, закон сохранения массы и энергии».

С этой вершины уже можно было заметить, что потеря части ядерной энергии при радиоактивном распаде обязательно должна сопровождаться потерей и части его массы.

На первом же международном Сольвейском конгрессе, посвященном строению вещества, в 1913 году, уже после открытия атомного ядра, французский ученый П. Ланжевен впервые высказал мысль о том, что недостача в атомном весе изотопов по формуле $E = mC^2$ связана с изменением энергии атомных ядер.

— Значит, по формуле А. Эйнштейна можно найти запас энергии ядра, соответствующий величине «дефекта массы»?

— Недостача в массе означает потерю энергии, а не ее запас. Залог существования каждой упакованной из отдельных составных частей системы, в том числе и ядра, — энергия, выделяемая при образовании системы.

— Из каких же запасов черпает энергию радиоактивное излучение?

— Тяжелые нестабильные ядра имеют меньший «дефект масс», чем более плотно упакованные ядра среднего веса. Энергия, соответствующая разнице между этими недостачами, и есть тот заряд, который делает тяжелые ядра нестабильными и при случае взрывает их, сообщая большую скорость частицам радиоактивного излучения.

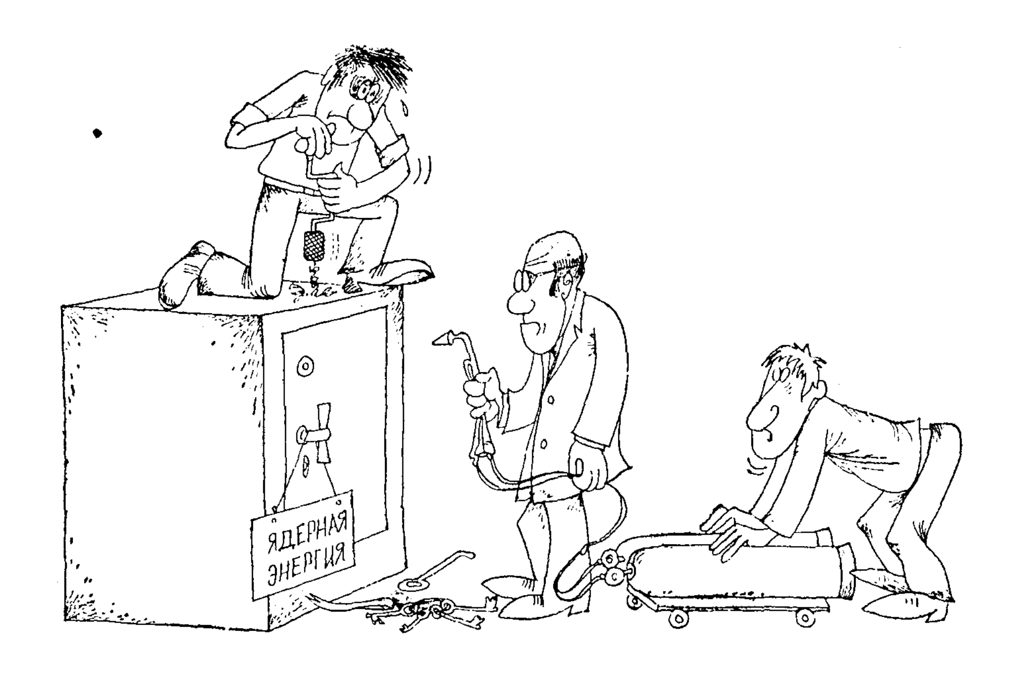
Понять, почему атомные ядра облагаются налогом за право существования, самим физикам удалось только после того, как они разобрались в структуре ядра.

Первые же сведения о зарядах и массах «точечных» ядер атомов наводили на мысль, что эти точки, в свою очередь, слеплены из других частиц. Но из чего могло состоять ядро?

Идея У. Праута о типовом строении атомов всех элементов из атомов самого легкого элемента — водорода, в переводе на ядерный язык звучала так: все ядра состоят из ядер атомов водорода.

И в самом деле, из ядер водорода (их назвали протонами) легко можно было получить массу любого изотопа, а их единичные положительные электрические заряды определяли заряд ядра.

Беспокоило только одно обстоятельство, которое никак не удавалось обойти. Если сложить положитель-



ные заряды всех протонов, участвующих в построении ядра с определенной массой, то сумма получалась больше, чем был заряд, который на самом деле имело ядро.

Деваться было некуда. Физики пошли на компромисс и признали, что ядра не могли состоять из одних протонов. Что-то должно было нейтрализовать какое-то число зарядов протонов.

Тут бы и разгуляться воображению, тут бы... Но суровая реальность подрезала крылья фантазии. Ассортимент подходящего строительного материала для ядер был очень беден. Приходилось брать не то, что надо, а то, что есть. А кроме протона, на учете у ученых была только одна-единственная частица — электрон с единичным отрицательным электрическим зарядом. Масса у электронов небольшая, поэтому практически, не меняя веса ядра, они могли нейтрализовать какое-то число положительных зарядов протонов.

Однако вскоре обнаружилась «несовместимость» протонов с электронами в ядрах, доставившая физикам массу забот и хлопот в объяснении многих ядерных свойств.

Только через двадцать лет ученик Э. Резерфорда Дж. Чедвик обнаружил настоящего компаньона протона по ядру — нейтрон. Новая элементарная частица имела почти такую же массу, как и протон, но была нейтральной, без электрического заряда. Это было как раз то, что нужно.

Теперь старинный лейтмотив о единстве строения материи уверенно и мощно зазвучал в переложении на ядерный, нейтронно-протонный лад.

В новом переложении была та долгожданная гармония, которая до конца прояснила самую суть явления радиоактивности, как превращения ядерных протонов или нейтронов.

Например, радиоактивный бета-распад есть не что иное, как превращение одного из нейтронов ядра в протон и электрон. Протон остается в ядре, а электрон его покидает. От этого в исходном сообществе нуклонов (такое общее название имеют протоны и нейтроны) появляется лишний протон; заряд ядра увеличивается на единицу, и атом с таким ядром представляет собой атом элемента, у которого порядковый номер на единицу больше.

Осталось уяснить последнее. Почему общая масса протонов и нейтронов, находящихся в ядре, всегда меньше суммы масс такого же числа свободных нуклонов?

Можно было бы сказать коротко: потому что нейтроны и протоны в ядре связаны. Но легко догадаться, что подобный ответ повлек бы за собой следующую реплику: «А что значит связаны?»

К сожалению, в макромире невозможно найти точной аналогии тому, что происходит в ядре с нуклонами. Не годятся и поверхностные сравнения с клеем или цементом. Возможно, поможет такой образ. Связывает нуклоны тот налог, который в момент образования ядра взимается с него самым строгим фининспектором — природой.

Отдав часть своей энергии, свободные прежде нейтроны и протоны поступают в полное распоряжение мощных сил притяжения, действующих на расстоянии, сравнимом с размером ядра. А по формуле А. Эйнштейна: теряющий энергию теряет и в массе. Так возникает недостача в массе атомного ядра.

Энергия, выплачиваемая ядром за право быть самим собой и равная той, которую следует затратить при желании расчленить его на отдельные нуклоны,

называется энергией связи. Чем она больше, тем труднее разрушить ядерную систему нуклонов.

Так уж случилось, что природа с каждого нуклона самых легких и самых тяжелых ядер взимает налог меньший, чем с нуклона средних ядер.

Избыток энергии, обладателями которого легкие и тяжелые ядра становились с момента рождения где-то в глубинах гигантских звезд, стал для человека драгоценным подарком природы.

В устойчивых ядрах этот подарок хранился так же надежно, как деньги в недоступных и несгораемых сейфах банка.

Заманчивый излишек энергии содержался и в куске урана, и в колбе с тяжелой водой, в молекулах которой находится тяжелый изотоп водорода — дейтерий. А воспользоваться им было невозможно: настоящий «неразменный рубль» из сказки. Только самопроизвольное радиоактивное превращение тяжелых ядер распахивало двери сейфа, и под носом у физиков альфа-частицы, электроны и гамма-кванты разносили часть хранившейся там энергии на все четыре стороны.

Перед людьми встала задача огромной важности — научиться вскрывать хранилища ядерной энергии.

Ученые долго не знали, как это сделать; у них не было подходящих для этой цели инструментов.

В химических реакциях вещества отдают энергию лишь в момент перестроения электронных оболочек атомов и молекул.

Знакомство с явлением радиоактивности еще раз убеждало, что некоторую долю внутренней энергии атомы тяжелых нестабильных элементов излучают только во время перестройки своих ядер. Как же вызвать ядерную реакцию?

У химиков никогда не было подобных затруднений. С помощью обычной спиртовки они легко сообщали молекулам реагирующих веществ те доли электрон-вольта, что требовались для начала химической реакции. На реорганизацию же крепко связанного коллектива нуклонов требовалось гораздо больше усилий. Ведь энергия связи ядер достигала десятков и сотен миллионов электрон-вольт.

И когда окончательно прояснилось, что плетью обуха не перешибешь и что с энергией меньше миллиона электрон-вольт в руках ядро не переделать, физики попытались обстрелять легкие атомные ядра такими снарядами, как альфа-частицы радиоактивного излучения. И вдруг удача. Альфа-частицы с энергией в несколько миллионов электрон-вольт так разворошили ядра азота, что они стали распадаться на ядра кислорода и протоны. Это была ядерная реакция, осуществленная по желанию человека.

«Резерфорд был первым человеческим существом, — писал один из создателей квантовой механики, Луи де Бройль, — которому посчастливилось осуществить вековую мечту алхимиков — искусственно превратить один химический элемент в другой». Но если алхимики искали способ получения из дешевых веществ лишь золота, то в результате успеха «ядерной алхимии» человечество получало гораздо более ценное сокровище — новый источник энергии.

Наблюдая за первой ядерной реакцией, расщеплением ядер азота, Э. Резерфорд заметил, что протоны, которые он регистрировал, уносили из распадавшегося ядра энергию большую, чем приносили в него альфа-частицы. Так исследователь впервые сумел чуть-чуть приоткрыть ядерный сейф с запасом энергии.

Позже было обнаружено, что с выделением энергии расщеплялись и некоторые другие ядра. Химические реакции, в которых выделяется энергия, называются экзотермическими. Это же наименование получили и ядерные реакции. Но какая разница была в количестве выделяемой энергии! Перестройка одной молекулы в химической реакции давала энергетический выигрыш максимум в несколько электрон-вольт. Щедрость ядерной реакции поразила современников. Первое же распавшееся ядро (ядро азота) наделяло вылетающий протон энергией в миллион раз большей.

Узнав об экспериментах по расщеплению ядер, Ф. Содди писал в 1919 году: «Эти открытия показали, что суровая борьба за существование, за истощенные источники природной энергии, которую вело человечество до сих пор, вовсе не является единственным и неизбежным уделом человека. Ничто не мешает нам думать, что наступит день, когда мы сможем использовать для наших нужд первичные источники энергии, которые природа ревностно хранит для будущего».

Среди гула восхищенных голосов людей, у которых новые достижения науки всколыхнули надежды на ре-

шение извечной проблемы топлива, остался неуслышанным одинокий голос поэта.

Мир рвался в опытах Кюри
Атомной — лопнувшею бомбой... —

писал в 1921 году А. Белый в поэме «Первое свидание».

Но люди пока не склонны прислушиваться к предвидению чувств, не доверяют тому, что не основано на расчетах и формулах. А грядущая опасность как раз гнездилась в сфере чувств и моральных устоев. Уже во время первой мировой войны возник интерес к вопросу об использовании радиоактивных излучений в военных целях.

Э. Резерфорд вынужден был заявить, что ученые стремятся использовать внутреннюю энергию радия в своих познавательных целях. «К счастью, — добавил отец ядерной физики, — в настоящее время мы не нашли метода для применения энергии радия», — и выразил надежду на то, что он не будет найден до тех пор, «пока человек не будет жить мирно со своими соседями».

Впрочем, в то время еще не было особых поводов ни для опасений, ни для восторгов.

Химические реакции обладали пока очень важным преимуществом по сравнению с ядерными. Например, реакции горения были самоподдерживающимися, в них участвовала сразу большая масса вещества, а ядерные реакции расщепления оставались всего лишь изредка вспыхивающими искорками.

Ядра по сравнению с молекулами обладают огромной энергией, но расстаются с ней только те, в которые попадает альфа-частица. Вероятность же такого события не больше вероятности попадания из дробовика в глаза мухе, сидящей на вершине дерева. Ядро легкого атома поражается в эксперименте одной из 100 000 альфа-частиц. А в тяжелое ядро попадает и того меньше — одна частица из миллиона.

Ситуация не изменилась и после запуска первого ускорителя протонов в лаборатории Э. Резерфорда. Были обнаружены новые экзотермические ядерные реакции — и только.

Сокровище — ядерная энергия — лежало рядом. Человек научился «своими руками» добывать небольшую частицу ядерного «огня», но о практическом использовании его пока не могло быть и речи.

Открытие естественных радиоактивных веществ, которые долгие годы испускают небольшие порции внутриядерной энергии, несколько походило на приобретение «вечной свечи». А выигрыш в энергии от ядерных реакций, вызываемых ускоренными протонами, был не больше копеечного приза, полученного в тире незадачливым человеком, растратившим на выстрелы всю свою зарплату. Гораздо больше энергии затрачивалось на ускорение частиц, чем выделялось в результате реакции.

Какой уж тут оптимизм! Даже в 1937 году Э. Резерфорд говорил: «Перспектива получения энергии при искусственных процессах превращения не выглядит обещающей».

Он оказался прав. С помощью отдельных экзотермических ядерных реакций невозможно было получить энергию в тех количествах, в которых нуждалось человечество.

— А существует ли вообще такая реакция, в которой ядро сразу отдавало бы весь свой энергетический запас?

— В принципе физики знали, как этот запас получить целиком. Уверенность им придавал «дефект масс». Максимальная энергия могла выделиться при превращении ядра самого тяжелого элемента в ядро элемента из средней частицы таблицы. Трудность заключалась лишь в том, как разбить тяжелое ядро на более мелкие.

— А не проще соединять самые легкие ядра, имеющие, кажется, тоже маленький «дефект масс» и обладающие избытком энергии?

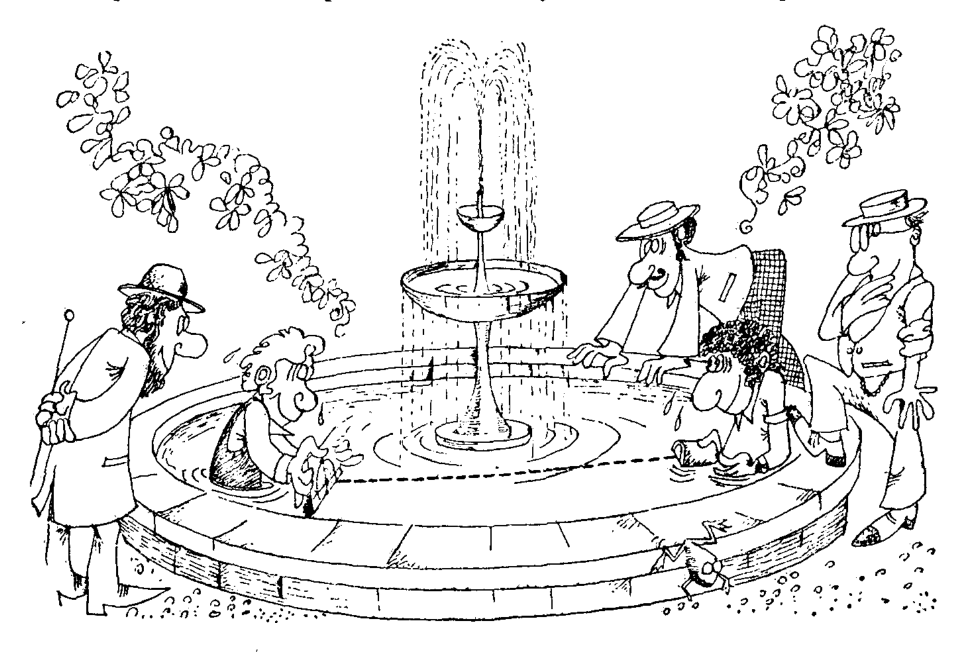
— Такие реакции идут в раскаленных звездах. Но в лаборатории ускоритель расходовал так много энергии на сближение двух ядер, например, изотопа водорода — дейтерия, — что слова о возможном ее выигрыше звучат как насмешка. И все же ученым вскоре удалось найти путь к овладению ядерной энергией.

В 1934 году французские ученые Ф. Жолио-Кюри и его жена И. Кюри, дочь знаменитой М. Склодовской-Кюри, открыли новое явление — искусственную радиоактивность атомных ядер. Супруги Жолио-Кюри облучали альфа-частицами ядра алюминия. В результате

ядерной реакции впервые был получен не существующий в природе радиоактивный изотоп фосфора.

Так через сорок лет потеряла свою уникальность естественная радиоактивность атомных ядер. Человек научился превращать любые стабильные вещества в радиоактивные, бомбардируя ядра разных химических элементов протонами, нейтронами и альфа-частицами.

Нейтроны играли особую роль в создании искусственных радиоактивных изотопов. У этих частиц нет электрического заряда, поэтому они легко преодолева-



ли электростатический барьер (одноименные заряды отталкиваются), которым окружены тяжелые заряженные ядра.

С нейтронами предпочитал работать молодой, но уже известный итальянский ученый Э. Ферми. Открытие французских ученых его чрезвычайно заинтересовало. Физик-теоретик Римского университета, создатель теории радиоактивного бета-распада, он решил вместе со своими коллегами начать эксперименты по облучению тяжелых ядер нейтронами.

Почему именно тяжелых?

Э. Ферми задумал перешагнуть границу периодической таблицы и получить элемент, ядра которого имели бы протонов больше, чем их в ядрах самого тяжелого из известных элементов. Ученый был убежден, что нейтроны, попадая в переполненные нуклонами ядра урана, принудят их к радиоактивному бета-распаду. А если это так, то ядро урана и приобретет вожделенный дополнительный протон.

Необходимое для нейтронной атаки урана оборудование состояло из источника нейтронов, урановой мишени и ящика со свинцовыми стенками, обложенными изнутри парафином, для защиты экспериментаторов от радиоактивного излучения.

О ящике, казалось бы, можно было и не упоминать, но совершенно неожиданное влияние его на измерения натолкнуло Э. Ферми на открытие, которое значительно ускорило путь к овладению ядерной энергией.

После нескольких опытов ученые с удивлением обнаружили, что в разных местах ящика уран «глотает» нейтроны, так сказать, с разным аппетитом. Мистика? Досадная помеха?

Э. Ферми увидел в этом нечто большее. Утром он пришел в университет с готовым объяснением. А чуть позже на одной из улиц Вечного города произошло странное событие. Группа молодых людей, выскочив из ворот университета, помчалась прямо к ближайшему фонтану. Они опустили в воду источник нейтронов, мишень, и... идея Э. Ферми блестяще подтвердилась.

Обдумав полученные накануне результаты, Э. Ферми предположил следующее. Вероятно, все дело в том, что поглощение нейтронов тяжелыми ядрами зависит от энергии самих нейтронов.

Вода — прекрасный замедлитель для нейтронов. Сталкиваясь с ядрами водорода — протонами, — нейтральные частицы быстро затормаживаются до скорости теплового движения молекул воды (такие нейтроны называют тепловыми). А замедлившиеся в толще воды тепловые нейтроны с гораздо большей вероятностью захватывались ядрами урана. В тот памятный день фонтан стал очень важной деталью экспериментальной установки.

Обнаруженное явление полностью разъяснило и историю с ящиком. Отражаясь от парафиновых блоков, нейтроны теряли энергию, замедлялись и гораздо охотнее вступали в реакцию с ядрами мишени. Только в разных местах ящика из-за его формы количество таких замедленных нейтронов было неодинаковым. Вот и вся мистика.

Наконец настал день, когда можно было приступить к анализу полученных радиоактивных ядер. Тишина университетских коридоров то и дело нарушалась топотом ног. Это в химическую лабораторию проносился с облученной мишенью в руках очередной сотрудник группы Э. Ферми или он сам.

А вот и результаты: обнаружен новый радиоактивный элемент!

Э. Ферми называет его «трансурановым», то есть расположенным в периодической таблице за элементом урана.

Но это был не заключительный акт, а только пролог к богатой своими последствиями истории с ураном. Опытами по облучению урана тепловыми нейтронами занимались и другие ученые. «Ядерная лихорадка» охватила многие лаборатории мира. В 1938 году И. Жолио-Кюри и югославский физик П. Савич тоже повторили эксперимент Э. Ферми, но получили совершенно противоположный результат.

В облученной мишени они обнаружили изотопы элементов не более тяжелых, чем уран, а похожих по своим химическим свойствам на элементы из середины периодической таблицы.

Так какие все-таки получаются ядра? Сверхтяжелые или, наоборот, более легкие? Кто прав, Э. Ферми или И. Жолио-Кюри и П. Савич?

Заинтригованы были и экспериментаторы и теоретики. Над этой проблемой интенсивно работали не только в Париже, но и в Германии, и в Швеции.

А оказалось, что никакого противоречия не было. При облучении урановой мишени возникал не только новый трансурановый элемент, но еще около двадцати более легких химических элементов. Каждому из них надо было задать вопрос: «Маска, кто вы?» И никто не предполагал, что под двумя наиболее простыми из них, барием и лантаном, скрываются свидетели и участники совершенно необычной реакции — реакции деления ядер урана. Вот эта реакция и преподнесла людям энергию, запасенную в ядрах еще со времени их образования.

Распознать все компоненты полученной Э. Ферми смеси изотопов удалось только в 1939 году благодаря усилиям таких ученых, как И. Жолио-Кюри и П. Савич, Л. Мейтнер и О. Фриш, О. Ган и Ф. Штрассман.

Когда полностью рассеялся туман предположений, ошибок, гипотез и старых представлений, все полученные при облучении урана нейтронами изотопы были расставлены по клеточкам таблицы элементов.

Прежде всего точно установили, что урановая мишень состояла из двух изотопов урана с атомным номером 92 и числом нуклонов, равным 235 и 238.

Уран-238, как и предполагал Э. Ферми, захватывая нейтрон, превращался в радиоактивный уран-239. Один из нейтронов этого ядра превращался потом в протон и электрон. А этот дополнительный протон увеличивал на единицу атомный номер вещества.

Э. Ферми действительно получил ядро первого трасуранового элемента, девяносто третьего, названного нептунием.

Нептуний, в свою очередь, испытывал бета-радиоактивный распад и превращался в ядро следующего трансуранового элемента, который получил название «плутоний».

Но неошибочным было и сообщение из Парижа.

Ядра более легкого изотопа урана, поглощая тепловые нейтроны, совершали головокружительный «трюк» — скачок сразу через несколько десятков клеточек таблицы Менделеева. Они делились на две примерно одинаковые части; из одного тяжелого ядра урана возникало два — ядро элемента лантана и ядро элемента бария, оба в более легкой весовой категории.

Капитальная перестройка этой огромной, слабо связанной системы, состоящей из нескольких сотен нуклонов, в крепко связанные небольшие коллективы нуклонов ядер среднего веса, конечно, не обошлась без «усушки» и «утруски».

«Дефект масс» у новых изотопов был больше, и по формуле $E = mc^2$ можно было подсчитать, что при делении каждого ядра урана должна была освобождаться энергия около 200 миллионов электрон-вольт. Эксперимент подтвердил реальность этой величины.

— Да, это число потрясает. Наконец мечта людей осуществилась и они получили новый источник энергии?

— Нет. Реакция деления отдельных ядер еще не обеспечивает выход практически используемой энергии.

— Почему?

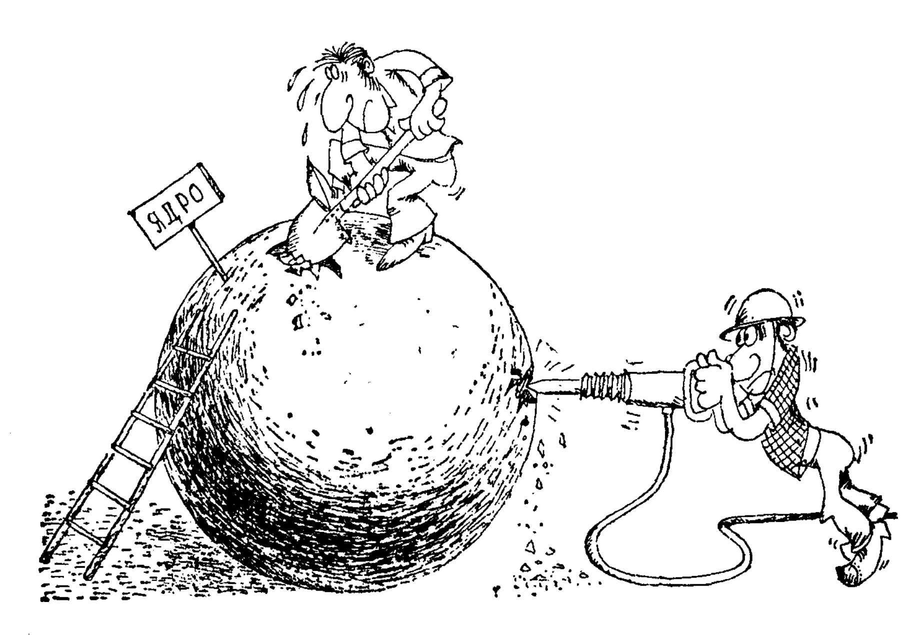
— Она не может конкурировать с химической ре-

акцией горения, в которой участвует сразу огромное количество молекул. Вот если бы и реакция деления обладала таким свойством!

— Значит, овладение ядерной энергией целиком и полностью зависело от того, как идет реакция деления?

— По сути дела, да.

Ф. Жолио-Кюри еще в 1935 году в своей Нобелевской лекции говорил: «Если заглянем в прошлое и охватим взором прогресс науки, который происходит все более и более нарастающими темпами, мы получим право думать, что исследователи, которые создают или разрушают элементы по своему желанию, сумеют добиться превращений, имеющих характер взрыва, добиться настоящих цепных реакций. Если мы сможем осуществить подобные превращения, то удастся высвободить огромное количество энергии, которую можно будет использовать».



Не одиночные реакции деления ядра урана, а цепные реакции, в которых принимают участие атомные ядра большой массы вещества, — вот единственная тропинка, которая могла привести к практическому использованию ядерной энергии!

До открытия реакции деления об этой тропинке ничего не было известно. Но в 1939 году Ф. Жолио-Кюри уже знал, где ее искать.

Деление каждого ядра урана сопровождается рождением нескольких нейтронов. Казалось бы, эти нейтроны могли, в свою очередь, вызывать деление новых ядер, и в реакцию была бы вовлечена большая масса вещества. Однако окончательный вывод о том, могут ли развиваться цепные реакции в уране, зависел от количества нейтронов, сопровождающих деление.

Итак: вопрос: «Получит или не получит человечество новый источник энергии?» — можно было поставить более конкретно: «Сколько нейтронов испускается при делении одного ядра урана?» Окажись их в среднем меньше двух с половиной — и реакция деления представляла бы только чисто научный интерес.

Ф. Жолио-Кюри в сотрудничестве с Г. Альбаном установил, что при делении урана испускается в среднем около трех вторичных нейтронов. И этот факт сразу показал, что цепные ядерные реакции оказались реальным способом получения ядерной энергии.

Но, как и всякое открытие в любой области науки, цепные ядерные реакции деления можно было использовать как в мирных, так и военных целях. Настало время, когда человечество должно было сделать свой выбор: строить реакторы, где ядра урана под контролем непрерывно отдавали бы избыток энергии, или создавать бомбы, в которых неконтролируемые цепные реакции вызывали бы взрыв колоссальной разрушительной силы. Вторая мировая война способствовала осуществлению трагического предвидения поэта А. Белого. И лишь после окончания войны были перевернуты последние страницы истории овладения ядерной энергией. Атомные ядра приобрели, наконец, мирную профессию, и приобрели ее поначалу в Советском Союзе.

Первая в мире ядерная электростанция — Обнинская — продемонстрировала всему миру, какую пользу может принести людям управляемая ядерная реакция.

Но, подарив людям ядерную реакцию, физики еще очень мало знали о самом ядре. Бытовые подробности жизни крепко спаянного ядерного коллектива нуклонов оставались неизвестными. Как протон и нейтрон ведут себя в ядре, как общаются друг с другом, каким они подчиняются законам?

Исследователи вправе были ожидать, что познание

этих законов даст им возможность управлять атомными ядрами, по желанию создавать необходимые людям вещества, одним словом, «вить из ядра веревки».

Многие полагали, что кратчайший путь к этой цели ведет через тщательное изучение взаимодействий двух отдельных нуклонов. Наблюдения за столкновением протона с протоном, протона с нейтроном, казалось, должны были в значительной мере прояснить взаимоотношения между этими частицами в ядрах.

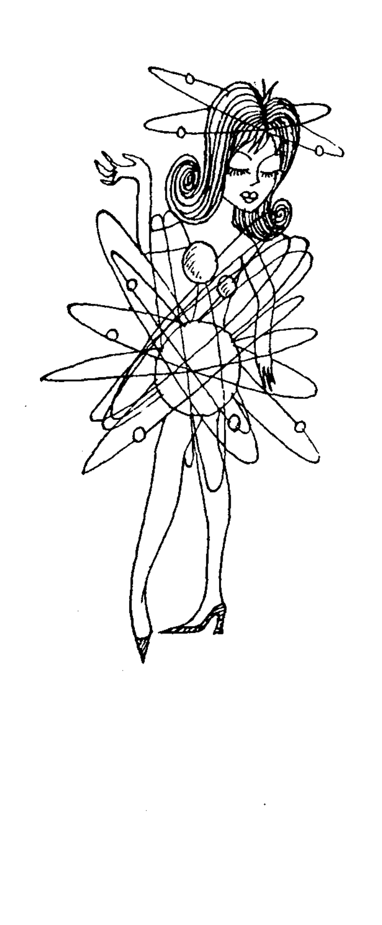
В крупнейших лабораториях мира были созданы ускорители протонов. В огромных установках, похожих на заводы, с помощью сложнейших приборов ученые следили за моментом встречи между двумя свободными нуклонами. Частицы сталкивались, разлетались, образовывались новые частицы, а тайна строения ядра оставалась неразгаданной. Думали, что еще немного терпения, еще серия экспериментов, еще сильнее разогнать протоны, и можно будет понять основные принципы поведения нуклонов в ядрах. Но... наращивая свою мощь, ускорители увеличивались в размерах, разгоняемые ими протоны становились все более быстрыми, наблюдения накапливались, а ядро продолжало оставаться столь же загадочным и полным тайн, как улыбка леонардовской Моны Лизы.

Ожидания физиков-ядерщиков не оправдались. Мимолетные встречи нуклонов большой энергии мало походили на отношения, сложившиеся в долгоживущем сгустке ядерных нуклонов, пропитанном мощными ядерными силами. Чем с большей энергией сталкивались нуклоны, тем с большей вероятностью рождались новые частицы, не имевшие никакого отношения к ядру.

Неожиданно перед физиками открылся густонаселенный мир элементарных частиц и возникли сотни новых труднейших вопросов. Этими вопросами и занялась выросшая из недр «Ядерной физики» «Физика элементарных частиц». А исследователи атомных ядер начали нелегкую работу по вскрытию глубинных пластов сокровенных свойств атомных ядер.

Все, что было известно о сердцевине атома, подталкивало к мысли, что ядро нельзя рассматривать как сообщество отдельных нуклонов, как нельзя и организм считать простой суммой большого количества клеток.

ДОМ МОДЕЛЕЙ





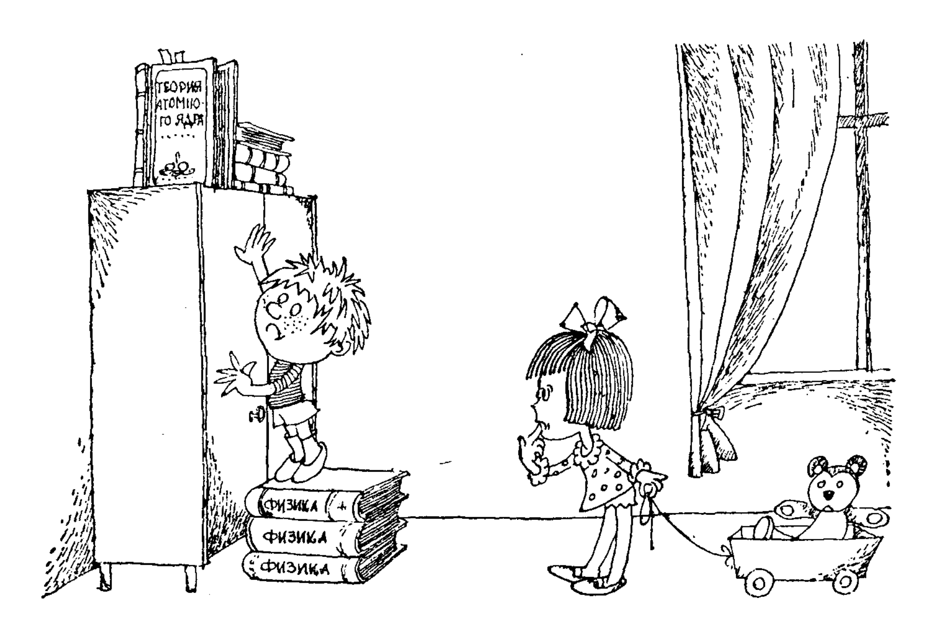


— Выходит, что первая атака на ядро не совсем удалась? Физики довольно легко овладели отдельными бастионами и взяли богатый трофей — ядерную энергию, — но крепость-то не пала?! А каков будет следующий штурм и есть ли общий стратегический план всей операции?

— Сражения происходят непрерывно на всех направлениях, однако генерального плана пока нет.

Составить общий план овладения тайнами ядра не так-то просто из-за необычности и недоступности тех сил, что держат оборону атомного ядра.

С момента обнаружения крошечной крепости в центре атома на Земле появилось третье поколение людей, и никто из них ни разу не пожаловался на какие-либо неприятности, которые доставило бы им незнание свойств ядерных сил. Дело в том, что они никак не проявляют себя в нашей повседневной жизни. Не то что гравитация или электричество! Но недоступные



чувственному опыту силы ядра — основа куда более могучих и всеохватывающих процессов в природе.

Гравитационные поля, пронизывающие просторы космоса, формируют галактики и звездные скопления, но именно ядерные реакции зажигают эти звезды.

Бесспорно утверждение, что окружающий нас мир густо насыщен самыми разнообразными электромагнитными явлениями. Биологические, химические и многие-многие другие процессы регулируются этими взаимодействиями. Но все многообразие стабильных веществ опять-таки обеспечивают ядерные силы, сдерживающие протоны и нейтроны в атомных ядрах химических элементов.

Впервые эти могущественные силы громко заявили о себе, когда Э. Резерфорд с помощью альфа-частиц «щелкнул по лбу» атомное ядро.

Не сразу удалось физикам точно установить, кто же нанес ответный удар. И подозрение поначалу пало на старых знакомых: тяготение и электромагнитные силы. Но первая кандидатура быстро отпала. Элементарные частицы столь легки, что даже на ничтожно малых расстояниях в атомном ядре они едва-едва ощущали гравитационное притяжение друг к другу. Со второй дело было немного сложнее.

Очень чувствительное к изменению расстояния между зарядами, электромагнитное взаимодействие удесятеряет свою мощь в микромире. Обычное электростатическое притяжение удерживает вокруг положительно заряженного ядра все атомные электроны, а число их в некоторых тяжелых элементах достигает сотни.

Электростатические силы действуют и внутри ядра. Но они не могут быть цементирующей силой: все протоны, имеющие одинаковый положительный электрический заряд, отталкивают друг друга и стремятся разорвать ядро. В конце концов это и должно наступить.

Наконец непонятно было, что заставляет оставаться пленниками ядра нейтральные частицы — нейтроны. Вначале ученые предположили, что тут вступают в игру силы магнитного притяжения, но их было явно недостаточно для сцепления нейтронов с протонами.

Аргументы «против» перетягивали чашу весов, и вторая кандидатура также была признана несостоятельной.

Не оставалось ничего иного, как предположить, что в атомных ядрах распоряжались новые, неизвестные дотоле силы, которым даже электромагнитные проигрывали в отношении $1:10^4$! И теоретикам предстояло создать теорию атомного ядра, естественно, с учетом этого отнюдь не облегчающего, а усложняющего их задачу обстоятельства.

Квантовая механика как будто могла стать хорошей основой для построения теории ядерного взаимодействия по аналогии с электромагнитным, которое мыслилось как результат обмена фотонами.

Следуя этой аналогии, а также правилам «хорошего тона», принятым в строгой теории, надо было признать, что существуют некое поле ядерных сил и частицы-кванты этого поля. Протоны и нейтроны, обмениваясь между собой этими квантами, оказываются связанными друг с другом.

К сожалению, никто не мог сразу указать на подходящий к данному случаю предмет обмена. Лишь через 15 лет после открытия нейтрона экспериментаторы обнаружили в космических лучах пи-мезон — частицу, которая могла служить переносчиком ядерного взаимодействия.

Теоретики воспрянули духом. Теперь оставалось мысленно вычленить из ядра пару нуклонов и, как на кинопленке, точно зафиксировать их манипуляции с пи-мезонами на языке формул. А там, казалось, недалеко и до генерального плана.

Подход неновый, им пользовался еще пушкинский Сальери:

Звуки умертвив,
Музыку я разъял, как труп. Поверил
Я алгеброй гармонию...

Но по отношению к ядру задача оказалась столь сложной, что не только алгебра — спасовала и высшая математика. С одной стороны, методы квантовой механики оказались не вполне пригодными для описания столь сильного взаимодействия, как ядерное. А с другой — выяснилось, что одни пи-мезоны не могли обеспечить достаточно тесного контакта между нуклонами.

Казалось, мезонная теория ядерных сил исчерпала свои возможности. Но в последнее время появились новые надежды. Оживление в рядах создателей теории было связано с открытием в эксперименте на ускорителях более тяжелых, чем пи-мезоны, векторных мезонов. Это были долгожданные партнеры пи-мезонов, частицы, которыми нуклоны, по-видимому, обмениваются на самых малых расстояниях. Пока количественного описания обмена этими частицами получить не удалось, но теоретики продолжают упорно работать в этом направлении.

А линия фронта ядерной физики все удлинялась. Исследования на ускорителях элементарных частиц дополнялись опытами, поставленными на ускорителях тяжелых ионов. Результаты, полученные в лабораториях, сравнивались с результатами поисков сверхтяжелых ядер в космических лучах и на дне океанов и наблюдений за астрономическими объектами галактик.

Потребность даже не в предсказании новых явлений, а хотя бы в объяснении уже известных, была чрезвычайно острой. Все поглядывали на теоретиков, ждали от них слова, надеялись, что теория вот-вот приступит к выполнению своих обязанностей. Но время шло, а теория молчала.

Физики заложили основу науки о микромире из теории относительности, квантовой механики и других фундаментальных законов и принципов. На этой основе они и должны были создать строгую, математически безупречную теорию атомного ядра.

Попытки протянуть непрерывную цепь аналитических выражений от общих физических законов до предсказания конкретных ядерных явлений не удались. И многие теоретики, махнув рукой на желанную респектабельность теории, стали искать более короткие пути к цели.

Не задумываясь о сущности механизма взаимодействия между протонами и нейтронами, они подбирали для него такие математические выражения, управляя которыми с помощью многочисленных произвольных параметров, можно было удачно описать характер взаимодействия двух нуклонов и рассчитать различные ядерные свойства.

Другой путь, тоже в обход строгой теории, проложили те, кто решил вообще не заниматься выяснением природы связей между составными элементами ядра, а сумел увидеть в нем нечто цельное — ядерное вещество. Они попытались объяснить экспериментальные результаты, исходя из самых общих его свойств.

— Неужели разумно говорить о каком-то особом ядерном веществе, словно у него есть собственный вкус или цвет?

В некотором смысле все атомные ядра сделаны из материала одного и того же артикула.

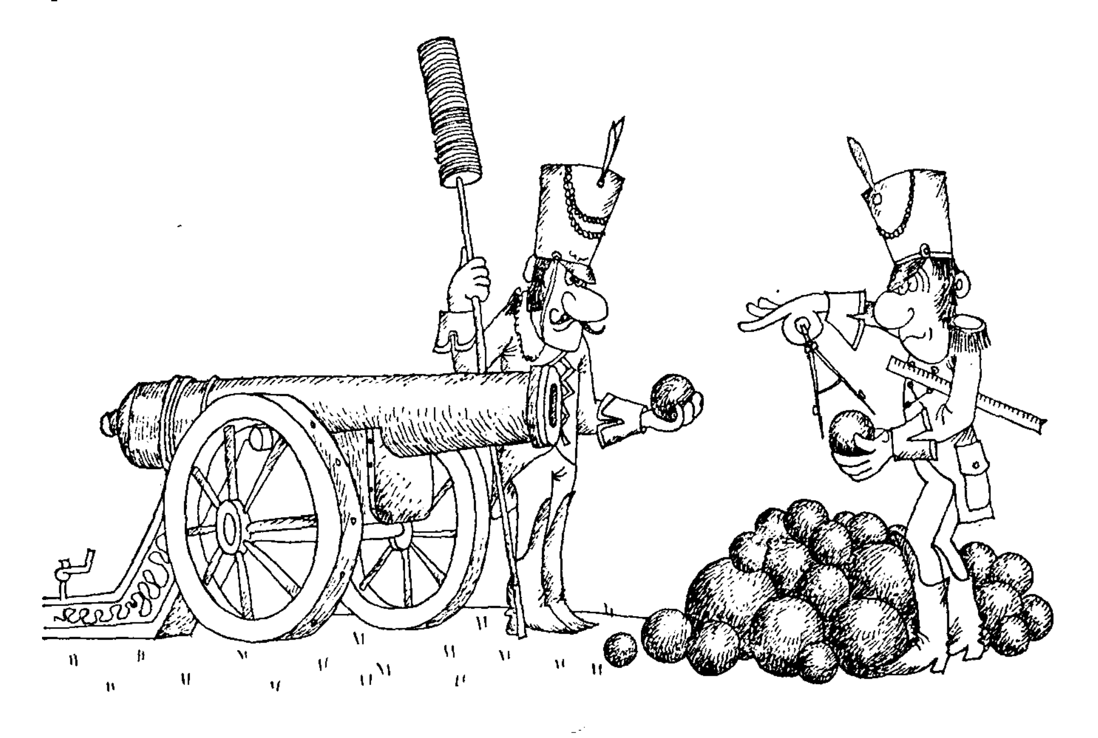
— Но ядра же состоят из протонов и нейтронов; при чем здесь артикул?

— И все-таки ядро можно вообразить частицей вещества, отдельные качества которого действительно напоминают привычные свойства окружающих нас вещей.

Первыми, кто высказал предположение, что ядро — это кусочек своеобразного ядерного вещества, были экспериментаторы, открывшие атомное ядро.

Специализации по ядерной физике среди теоретиков тогда не существовало. Первооткрыватели работали по принципу самообслуживания: кто обнаружил новое явление, тот сам должен ставить опыты для его изучения, сам обдумывать полученные результаты.

Физики, обнаружив атомное ядро, добросовестно принялись исследовать новый объект. И прежде всего



попытались получить ответы на самые простые из вопросов, приходивших в голову.

С помощью альфа-частиц, этого первого незамысловатого инструмента ядерной физики, удалось измерить электрические заряды атомных ядер. Затем, учитывая предрасположение альфа-частиц к ядерному притяжению, решили использовать их для того, чтобы узнать, какую область пространства занимает атомное ядро. Повозившись с одним-другим веществом, справедливо решили, что ядро ядру рознь; и не может, например, тяжелое ядро урана уместиться на том же крошечном пятачке, что и ядро легкого элемента. Перемерив размеры многих ядер, получили простую, но интереснейшую формулу. Словами ее можно было пересказать так: объем любого ядра пропорционален числу всех его нуклонов.

Конечно, эта скучная и сухая фраза не раскрывает, а скорее затушевывает скрытую в ней сногсшибательную новость. Но не надо слишком вдумываться в смысл полученного экспериментаторами результата, чтобы понять его так: на каждый нейтрон и на каждый протон в любом ядре приходится один и тот же объем.

Значит, можно говорить о ядерном веществе, как об особом материале, не имеющем, правда, специфического вкуса или запаха, но обладающем постоянной плотностью — свойством, которое присуще обычному веществу.

Итак, ядерное вещество — не фикция, а объективная реальность. И легкие и тяжелые ядра оказались только большими или меньшими изделиями из одного и того же материала, главное качество которого — плотность — не зависело от количества нуклонов в ядре.

Но что превращало частички ядерной материи (здесь слово «материя» употребляется как синоним слова «вещество» и неидентично философскому понятию материи) — протоны и нейтроны — в некое однородное вещество с особыми свойствами?? Может быть, изменяются в ядре сами нуклоны, как меняются крупинки муки в тесте?

Свободный нейтрон — нестабильная частица. Через 12 минут после рождения он распадается на протон, электрон и нейтрино, частицу без заряда и массы покоя. Теряя свободу, нейтрон в стабильном ядерном веществе приобретает право на столь же завидное долголетие, каким обладает свободный протон, который практически бессмертен. Положение же протона в ядерном веществе менее прочное, чем в свободном состоянии. В радиоактивном ядре он превращается в нейтрон, позитрон и нейтрино.

И все-таки изменения нуклонов в ядре не настолько радикальны, чтобы ими можно было объяснить особые свойства ядерного вещества. Мука превращается в тесто благодаря воде и энергичным рукам хозяйки. И то и другое в микромире заменяют ядерные силы. На них

же падает и полная ответственность за качество «ядерного теста».

Пока теоретики ломали копья, споря о том, как происходит ядерное взаимодействие и какими частицами перебрасываются нуклоны, экспериментаторы с помощью первых мощных ускорителей постепенно узнавали главные «кулинарные» секреты создания ядерного вещества.

Направляя ускоренные протоны на мишени из водорода и тяжелого изотопа водорода — дейтерия, — физики заставили нуклоны «разговориться». И те на понятном экспериментаторам языке рассеяния (отклонения одних частиц при столкновении с другими в разных условиях) поведали кое-что о ядерных силах.

После сложной обработки множества результатов измерений ученым удалось установить некоторые главные свойства ядерных сил, которые едва обозначившемуся образу атомного ядра придали бóльшую четкость. Каковы же эти свойства?

Во-первых, ядерные силы не делают никакого различия между протонами и нейтронами и совершенно одинаково связывают любую пару нуклонов.

Во-вторых, от гравитационного и от электромагнитного взаимодействия ядерные силы резко отличает способность к насыщению.

Нуклоны в ядрах контактируют одновременно только с несколькими ближайшими соседями и совершенно не взаимодействуют (некоммуникабельны) со всеми остальными ядерными частицами. Ядерные силы резко обрывают свое действие на расстоянии 10^{-13} сантиметра, что значительно меньше размера ядра, и создают крепко связанные между собой группки нуклонов. Так ядерные силы «замешивают» крутое ядерное вещество из протонов и нейтронов.

Подобное представление о ядре, опирающееся на известные из многочисленных экспериментов свойства ядерного вещества, помогло теоретикам объяснить результаты ядерных реакций и даже предсказать новые свойства ядер.

Надо заметить, что шли к этому представлению ученые по пути фантазии, догадок и интуиции. Путь этот не требовал срочной математизации ядерного взаимодействия. Надо было лишь догадаться, на что похоже ядерное вещество. Перефразируя слова выдающегося французского мыслителя Ш. Монтескье, можно сказать, что задача состояла в том, чтобы узнать подобие разных вещей и разницу подобных.

— Не представляю себе, как ядро, такой уникальный, по вашему заявлению, объект, может быть похожим на что-либо, кроме как на самого себя?

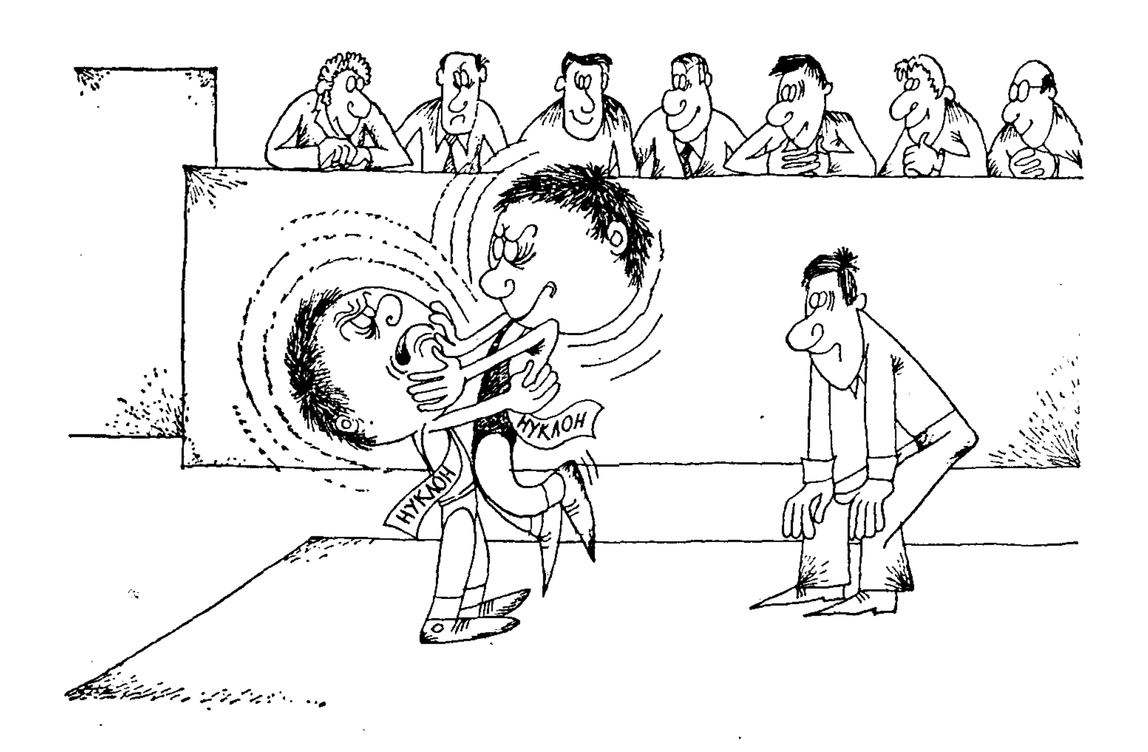
— Мы же убедились в том, что имеет смысл говорить о ядре как о кусочке вещества с определенной плотностью. Следовательно, нет ничего удивительного и в том, что однажды оно показалось теоретикам в чем-то похожим на обычную каплю воды.

— Это шутка?

— Нет. Оснований для подобной аналогии не так-то уж мало.

Ядро, воображаемое в виде капли ядерного вещества, и капля воды похожи даже внешне. Большинство ядер имеет сферическую или близкую к ней форму. Но такая же форма наиболее выгодна энергетически и для капли воды: в этом случае ее поверхность минимальна.

А заглянем внутрь этих систем! Вода — несжимаемая жидкость с определенной плотностью. Плотность постоянна и у ядерного вещества, кстати, тоже несжимаемого. Капля воды состоит из большого



числа отдельных молекул; ядро — из протонов и нейтронов. Аналогия частично распространяется также на свойства связей между внутренними элементами в этих столь различных системах. Действующие между молекулами воды химические силы — единственные в природе, которые обладают тем же свойством насыщения, что и ядерные.

Подобные факты, наверное, не могут не убедить и самого заядлого скептика. «Но к чему все эти сравнения?» — спросит он.

А вот к чему. Единственная цель поисков чего-то общего между ядром и каплей состояла в том, чтобы, опираясь на эту аналогию, вычислить массу ядра, объяснить результаты ядерных реакций. То есть обойти главный недостаток ядерной физики — незнание закона ядерного взаимодействия.

Как только было доказано, что ядро аналогично капле воды, стало возможным пытаться примерять к нему и другие особенности этого макрообъекта и самую главную — поверхностное натяжение в капле.

Частицы воды, образующие поверхность капли, притягиваются внутренними молекулами и как бы стягивают эту поверхность, создавая вдоль нее натяжение. А может быть, и свойства ядра-капли тоже можно описать с помощью поверхностного натяжения?

А почему бы и нет! В этом-то и заключается изюминка капельной модели ядра!

Ядерные силы — короткодействующие. Значит, нуклоны на поверхности ядра так же испытывают притяжение со стороны внутренних частиц и тоже создают поверхностное натяжение. Следовательно, ядерные силы вполне можно представлять себе как поверхностное натяжение в ядре-капле.

С точки зрения взаимодействий между нуклонами ядро — это ринг, на котором постоянно противоборствуют электростатическое отталкивание и ядерное притяжение. Стабильное ядро — это ринг, где все раунды оканчиваются победой сил притяжения.

В теоретическом образе ядра-капли против электростатического отталкивания протонов, которое стремится разорвать каплю, выступает поверхностное натяжение.

На результат поединка эта формальная замена действия ядерных сил на поверхностное натяжение не

оказывает никакого влияния, потому что новый участник, по сути дела, хорошо загримированный старый. Но физики сразу получили возможность вычислить, например, полную энергию ядра. К энергии отталкивания протонов прибавили энергию поверхностного натяжения, определять которую так же просто, как для капли воды.

Найденная по формуле А. Эйнштейна масса атомных ядер, соответствующая вычисленной энергии, неплохо согласовалась с экспериментальными значениями.

Это была первая крупная удача теории — награда за подсмотренную качественную аналогию между атомным ядром и каплей жидкости, разница в природе между которыми поистине огромна.

Плотности ядерного вещества и капли воды просто несоизмеримы: ядерное вещество в 10^{14} раз плотнее!

Несравнимы и величины поверхностного натяжения. Если на рамку шириной в 10 сантиметров с подвижной нижней проволокой натянуть мыльную пленку, то ее поверхностное натяжение вполне уравновесит грузик весом в один-полтора грамма. А поверхностное натяжение пленки из нуклонов, если бы ее можно было натянуть на ту же рамку, уравновесил бы груз весом не менее двухсот миллиардов тонн!

Первым, кто угадал подобие столь разных «вещей», был известный физик-теоретик Г. Гамов. Он успешно воспользовался им для создания теории радиоактивного альфа-распада. Однако триумфом этой замечательной идеи стало объяснение реакции деления ядер урана.

За 28 лет, что прошли после открытия ядра, физики приобрели некоторый опыт в общении с микромиром. И к новым ядерным реакциям, с которыми то и дело сталкивались экспериментаторы, работающие на ускорителе, относились уже довольно спокойно и сдержанно. Почему же такую суматоху и возбуждение вызвали на первых порах полученные Э. Ферми результаты в опытах с поглощением тепловых нейтронов ядрами урана? Почему ученым так трудно было решиться на то, чтобы сказать: «ядро урана разделилось на два более легких»? Ответ прост — новое явление противоречило всему, небольшому правда, опыту ядерной физики.

Два миллиона электрон-вольт требовалось для рас-

щепления такой непрочно связанной системы из одного протона и одного нейтрона, как ядро тяжелого изотопа водорода — дейтерия. А в более тяжелых ядрах на отрывание одной частицы надо было затратить энергию в три или четыре раза большую. Первый же ускоритель протонов, запущенный в 1931 году в лаборатории Э. Резерфорда, разгонял частицы всего лишь до энергии в один миллион электрон-вольт.

Снарядом такой малой мощности расщепить очень тяжелые ядра, и в частности ядра урана, не приходилось и мечтать. И вдруг почти без всяких затрат энергии, «бесплатно», ядро урана ни с того ни с сего расщепилось на две части. Как мог один-единственный медленный нейтрон, присоединившийся к 250 нуклонам ядра урана, привести его к катастрофе?

Известный советский физик-теоретик Я. Френкель, ученый, которому в большой степени был присущ образный подход к описанию физических явлений, обратил внимание на то, что основные особенности деления урана можно понять, если вновь воспользоваться аналогией с поведением капли воды.

В народе говорят, что трясогузка весной хвостом лед на реке разбивает. Конечно, когда все готово к началу ледохода, «поможет» и трясогузка.

Нейтрон, поглощенный ядром урана, приносит в ядро дополнительно всего 8 миллионов электрон-вольт энергии. Эта энергия ничтожна по сравнению с той, что содержится в самом ядре, но она нарушает условия поединка двух могущественных противников — электромагнитного отталкивания и ядерного притяжения, и раунд заканчивается победой отталкивания.

Нечто аналогичное делению ядра происходит в определенных условиях и с каплей воды или другой несжимаемой жидкости.

Если каплю воды, взвешенную в масле, слегка деформировать, то, несколько растянувшись поначалу, она опять вернется к исходной форме шара. Более сильное воздействие может растянуть каплю настолько сильно, что в конце концов она разорвется пополам. А тяжелое ядро урана-235 никогда не имело идеальной сферической формы. Победа ядерным силам давалась с большим трудом и готова была смениться поражением. 8 миллионов электрон-вольт, подаренные ядру тепловым нейтроном, как удар по ядерной капле, усиливали ее деформацию. Капля приобретала продолговатую форму, и электростатическое отталкивание на концах капли начинало преобладать над силами притяжения. В ядерной капле появлялась перетяжка, и ядро делилось на две части.

Известный датский физик-теоретик Н. Бор со своим сотрудником Дж. Уиллером на основе капельной модели ядра создали теорию деления урана. Вооруженные капельной моделью, теоретики решились даже на предсказание нового ядерного явления. Если ядро урана делится пополам только из-за того, что дополнительный нейтрон усиливает его деформацию, то оно вполне может разделиться и само по себе. Даже случайная перегруппировка движущихся нуклонов может стать причиной развала ядра урана. И предсказание оправдалось!

Молодые советские физики К. Петржак и Г. Флеров вскоре обнаружили, что ядра урана действительно способны к самопроизвольному делению.

Образ ядра-капли полонил воображение ученых. Первые успехи окрыляли, вселяли надежду на объяснение и других свойств атомных ядер. Но прошло некоторое время, и обнаружились слабые стороны капельной модели ядра.

— Видимо, физики слишком понадеялись на сходство ядра с каплей воды?

— Точнее сказать, теоретики пытались «выжать» из капельной модели больше того, что она могла дать. Например, эта модель, как выяснилось, неспособна объяснить «магические» числа нуклонов.

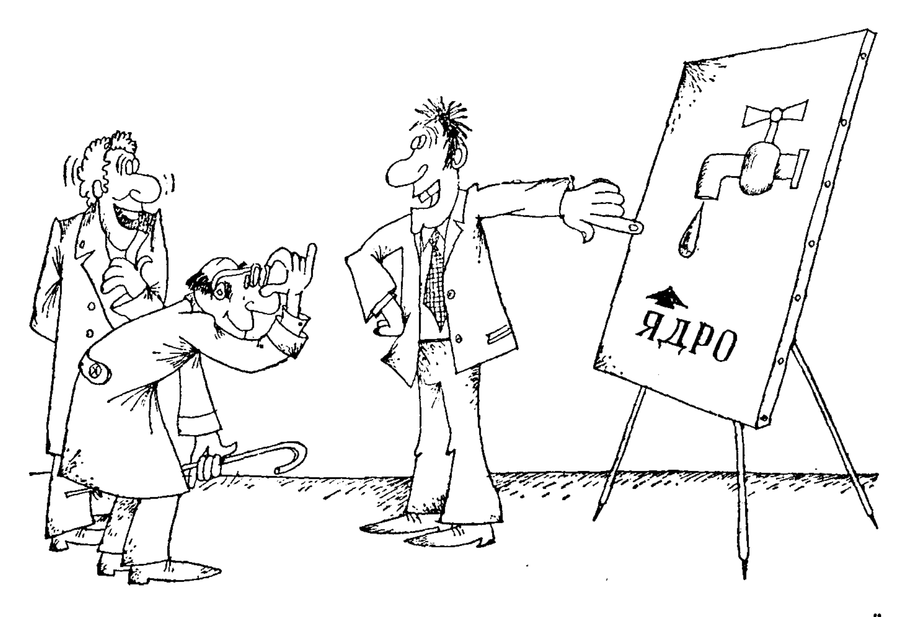
— Неужели в образовании ядер участвуют не только ядерные силы, но еще и магия?

— Экспериментаторы обнаружили такие свойства ядер, которые позволили теоретикам представить эти объекты совсем иными, совершенно непохожими на каплю ядерного вещества.

Знаменитые мистификаторы позавидовали бы богатым возможностям ядерных сил морочить физикам головы. Я. Френкель говорил, что «...физик-теоретик подобен художнику-карикатуристу... Хорошая теория сложных систем должна представлять лишь хорошую «карикатуру» на эти системы, утрирующую те свойства их, которые являются наиболее типическими...»

Изображение ядра в виде капли жидкости как нельзя более отвечало этим требованиям. Казалось,

что ничего лучшего создать и невозможно. Капельная модель ядра освобождала физиков от забот, связанных с необходимостью каким-то образом фиксировать состояния отдельных ядерных нуклонов. Можно было забыть о них и о треклятых ядерных силах. Удачно найденная модель разрешала вообще не задумываться над проблемой внутренней структуры ядра. Действительно, в несжимаемом ядерном веществе, имеющем огромную плотность, непрерывно сталкивающиеся нуклоны должны были так сильно взаимодействовать друг с другом,



что понятие «состояние нуклона в ядре» теряло всякий смысл.

Однако на одну и ту же натуру каждый художник смотрит по-своему. Один и тот же пейзаж воплощается в совершенно разные картины. Трудно было ожидать, что и ядро всем физикам представится в одном и том же свете. Несмотря на то, что первая «карикатура» на него многими была признана изумительно точной, кое-кто думал иначе.

Уже через 2 года после возникновения идеи о ядре-капле американский физик Бартлетт предложил свой оригинальный набросок, свое видение ядра. К сожалению, это было сделано не вовремя. Успех, выпавший на долю капельной модели в объяснении альфа-распада и реакции деления ядер урана, сделал всех просто неспособными обратить серьезное внимание на предложенную новую картинку.

Возможно, восприятию ее мешало одно существенное обстоятельство. В новой модели нейтроны и протоны размещались в ядре не равномерно, а, наоборот, в каком-то определенном порядке — группировались по особым оболочкам.

Подобное построение ядра казалось чрезвычайно искусственным и не соответствующим действительности, а модели Бартлетта, которая была названа оболочечной, не удалось завоевать сердца физиков ни через год, ни через два; они были отданы другой...

В течение 16 лет «карикатура» Бартлетта считалась злым шаржем и покрывалась пылью на полках «запасника». Но со временем все чаще и чаще на нее приходили взглянуть... экспериментаторы.

Дело в том, что от случая к случаю они получали такие результаты, которые могли охладить пыл самых ревностных почитателей модели жидкой капли.

Опустив в карман пять монеток по десять копеек, каждый может утверждать, что у него есть полтинник. Следуя этой привычной логике, естественно было ожидать, что и магнитные, и механические моменты количества движения всех ядерных нуклонов тоже складываются. Но вычисления приводили к несуразностям. Измеренные на опыте магнитный и механический моменты количества движения атомных ядер не имели ничего общего с предполагаемыми значениями.

Ученые искренне считали, что простое сложение моментов нуклонов согласуется с моделью жидкой капли, а оказалось, что вопрос о величине механического и магнитного моментов ядра невозможно решить, используя эту модель. Вот тогда-то бартлеттовская «карикатура» на ядро и показалась физикам уже гораздо симпатичнее, чем раньше. Они подумали: что, если затруднения в определении величин магнитных и механических моментов ядер связаны с тем, что протоны и нейтроны не теряют в ядре свою индивидуальность, и, следовательно, имеет смысл говорить о состоянии отдельного нуклона? Возможно, ядро имеет и внутреннюю структуру, благодаря которой магнитные и механические моменты нуклонов оказываются определенным образом ориентированными относительно друг друга!

В начале 50-х годов накопилось столько несогласующихся с капельной моделью экспериментальных фактов, что к этому времени она всем стала казаться далеко не всемогущей. Обнаружили, что ядра, содержащие 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126 протонов или нейтронов (эти числа прозвали в шутку «магическими»), обладают особыми свойствами. Они, эти ядра, отличаются особой устойчивостью по сравнению с другими. Но рекордсменами устойчивости являются владельцы дважды магических чисел нуклонов. Например, изотопы гелия-4 (два нейтрона и два протона), кислорода-8 (восемь протонов и восемь нейтронов), свинца-82 (82 протона и 126 нейтронов) и некоторые другие. Элементы, ядра которых содержали магические числа нуклонов, оказались распространенными в солнечной системе.

Но самым примечательным было подмеченное учеными периодическое изменение и повторение некоторых свойств у тех ядер, которые имели число нуклонов, близкое к магическому. Тут уж сама собой напрашивалась аналогия между внутренним устройством ядра и строением самого атома.

Повторение химических свойств элементов в периодической системе связано с периодическим заполнением электронами все новых и новых оболочек. И атомы с заполненными оболочками наиболее устойчивы в химическом отношении (например, инертные газы). А что, если и магические числа нуклонов соответствуют количеству мест в нуклонных оболочках ядер?

Недолго думая, физики торжественно вытащили на свет божий оболочечную модель и немало подивились тому, что очевидное ее сходство с оригиналом не вызывает никаких сомнений, а теоретики немедля принялись развивать, подчищать и уточнять основные детали этой идеи оболочечного строения ядра. За обоснование и глубокую разработку нового взгляда на ядро немецкие физики М. Гепперт-Майер и И. Йенсен и были удостоены в 1963 году Нобелевской премии по физике.

В рамках этой модели считается, что протоны и нейтроны движутся в ядрах по определенным орбитам. И в том ядре, где число нуклонов совпадает с магическим, предполагают физики, как раз и заполняется очередная оболочка. Так проявляют себя «волшебники» — ядерные силы.

Но физики и здесь умудрились замаскировать ядерные силы под некое усредненное силовое поле, которое управляет нуклонами. Подобно тому как гравитационное поле Солнца управляет планетами, а электромагнитное поле ядра — атомными электронами.

Новое представление о поведении нуклонов позволило, наконец, впервые правильно вычислить магнитный и механический моменты ядер и объяснить некоторые другие свойства.

Этот успех привел к реабилитации понятия «состояние отдельного нуклона» и подтвердил тот факт, что протоны и нейтроны движутся в ядре в какой-то степени независимо друг от друга.

Но никто из авторов разных моделей ядра и не заикнулся об отмене сильного взаимодействия между протонами и нейтронами. Как же можно было говорить о каких-то орбитах нуклонов внутри невероятно плотного ядерного вещества?

Этот вопрос, абсолютно корректный по отношению к макрообъектам, оказывается чересчур прямолинеен и даже неуместен по отношению к объектам микромира.

К сожалению, понятий, адекватно отражающих то, что происходит в мире ядер, нет в нашем языке. Словосочетания «сильно взаимодействуют» и «не взаимодействуют», которыми за неимением более подходящих пользуются физики, выражают только отдельные моменты, выхваченные из свойственной представителям микромира особой, квантовой манеры поведения.

Конечно, протоны и нейтроны взаимодействуют друг с другом сильно, иначе, как легко догадаться, им никогда не создать крепко связанной системы — ядра. И капельная модель, не обращающая внимание на состояние отдельных нуклонов, всячески подчеркивала эту особенность ядерного вещества.

По оболочечной же модели ядерный коллектив нуклонов существует в раз и навсегда заданном мирке определенных квантовых отношений. И строгие законы этого мира, в частности принцип Паули, запрещают даже двум одинаковым частицам находиться в одном и том же состоянии.

Получается заколдованный круг. С одной стороны, нуклоны должны взаимодействовать друг с другом (и сильно!), чтобы создавать крепко связанные, прочные

ядра. С другой — ядерные протоны и нейтроны не могут общаться между собой, потому что в результате любого контакта «кто-то теряет, а кто-то находит» энергию, и обе взаимодействующие частицы обязательно должны перейти в другие квантовые состояния. Но какие? Свободные места в ядре есть только на верхних оболочках, а более глубоко лежащие орбиты с меньшими энергиями никогда не пустуют. Куда же деваться той частице, которая при столкновении теряет энергию, оказывается в положении потерпевшей?

Вот и приходится считать протоны и нейтроны независимыми. Обреченные благодаря удачной маскировке ядерных сил на одиночество в плотной ядерной толпе себе подобных, нуклоны в то же время приобретают право на длительное перемещение по своим индивидуальным орбитам.

Два столь разных представления о ядре, по сути дела, непротиворечивы. И ядро-капля ядерного вещества, и идея об оболочечной структуре отражают вполне реальные, но противоположные черты в поведении этой уникальной системы из элементарных частиц.

— Не ядро, а прямо двуликий Янус!

— Увы; крошечная сердцевина атома скорее напоминает «человека с тысячью лиц».

— Как же физики разбираются во всех этих «лицах»?

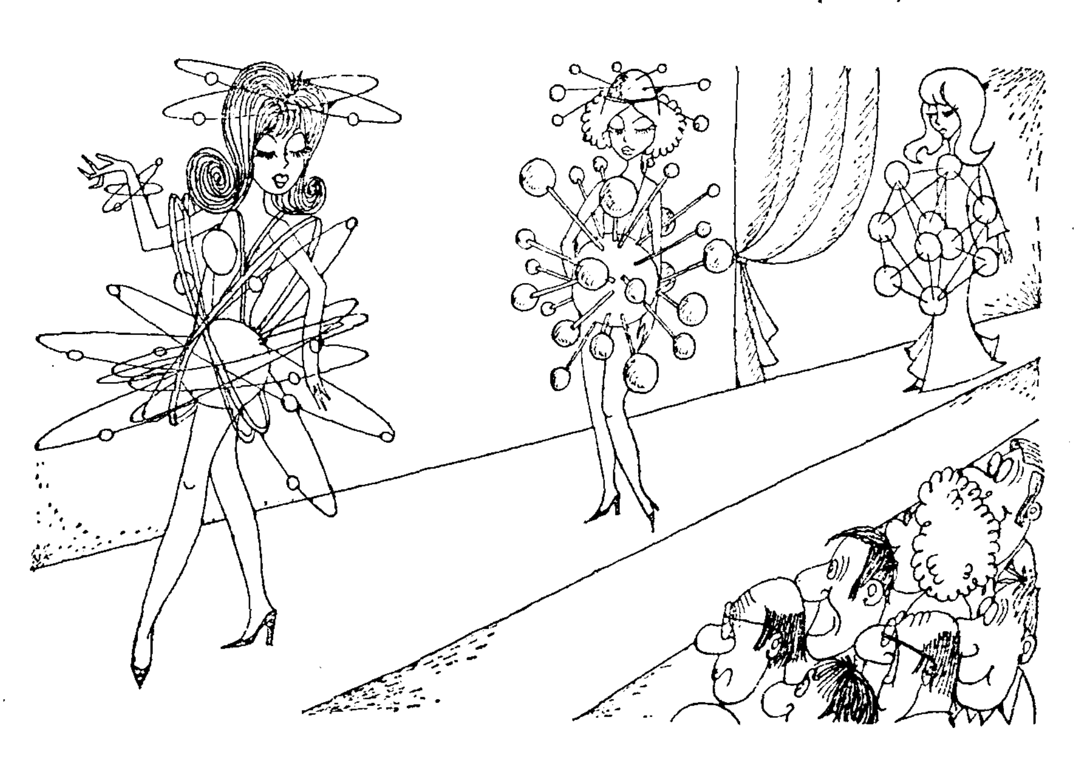
— Теоретики, как заправские модельеры, подбирают, а если не окажется подходящей, то создают новые модели для атомных ядер.

Атомные ядра в каждой конкретной ядерной реакции как будто проявляют себя с какой-то одной стороны. Тяжелые своим поведением напоминают каплю вязкой, несжимаемой жидкости, а более легкие демонстрируют независимость своих нуклонов друг от друга. Но детальное, глубокое исследование ядерных реакций опровергает это поверхностное впечатление. В ядре-капле часто проступают черты, определяемые оболочечной структурой. И наоборот, независимые нуклоны участвуют в коллективных движениях.

Теоретическое представление о ядре должно было отразить обнаруженное экспериментаторами единство двух противоположных черт.

Кажется, это так же трудно, как увидеть человека одновременно в фас и в профиль. Но портреты итальянского художника А. Модильяни убеждают нас в обратном. И для объяснения отклонения формы тяжелых ядер от сферической физикам удалось создать новую, обобщенную, модель атомного ядра, удачный синтез капельной и оболочечной моделей.

Уже говорилось, что деформация заметно меняет условия поединка сил внутри атомного ядра. Выявить, а тем более правильно вычислить величину искажения формы, на которую ядро расходует всего лишь несколько тысячных долей от своей полной энергии, так же



сложно, как подметить элементы былой стройности в фигуре располневшего человека. Тем не менее с помощью оболочечной модели можно рассчитать, в какой степени искажают форму нуклоны, перемещающиеся на внешней незаполненной оболочке и оказывающие несимметричное давление на поверхность ядра. А по капельной модели — объемные и поверхностные колебания ядерной жидкости, производимые коллективными действиями всех крепко сцепленных друг с другом нуклонов.

Ядра с заполненными оболочками имеют идеально сферическую «фигуру» и не знают, что такое деформация. Однако форма большинства не очень легких ядер далека от идеальной. Как же связать деформацию яд-

ра, возникающую от воздействия внешних нуклонов с коллективными колебаниями всех остальных протонов и нейтронов?

Можно представить, что любое тяжелое ядро состоит как бы из двух неразрывно связанных частей. Одна часть — это капля сферической формы с заполненными оболочками, а другая — это несколько нуклонов на внешней незаполненной оболочке.

Чем сильнее число внешних частиц отличается от ближайшего магического, тем больше они деформируют поверхность капли. Эта деформация тут же сказывается на состоянии внешних протонов и нейтронов, потому что меняется то усредненное поле сил, которое создают все нуклоны капли.

Так впервые удалось увязать свойства отдельных нейтронов и протонов с их коллективными движениями в ядре. И сразу же получили объяснение многие экспериментальные результаты. В частности, выяснилось, что порядок заполнения оболочек в тяжелых ядрах зависит от состояния всей его системы нуклонов в целом.

Обобщенная модель атомных ядер и сегодня пользуется большой популярностью у теоретиков. За ее создание совсем недавно, в 1975 году, Дж. Рейнуотер, О. Бор и Б. Моттельсон были удостоены Нобелевской премии.

Но ядро — этот удивительно многоликий объект микромира — зачастую проявляет себя с такой необычной стороны, что и с помощью этой модели невозможно объяснить все нюансы в его поведении. И теоретики вынуждены были создавать бесконечные вариации уже известных моделей, в которых учитывались бы дополнительные взаимодействия между нуклонами, и искать все новые и новые подходы к объяснению необычных экспериментальных фактов. Например, ядро сравнивается с различными макроскопическими системами. И не только с такими, скажем, как жидкость, газ или кристалл, но и с таким необычным состоянием вещества, в каком пребывает гелий при сверхнизких температурах.

Более 60 лет физики тщательно изучают «лики» атомных ядер. Но до сих пор единого портрета, передающего все своеобразие этой трудно уловимой для художника-теоретика натуры, сделать не удалось. Единой теории ядра и сейчас еще не существует.

Профессор Я. Смородинский сказал, что «ядро представляет собой очень сложную систему, с которой придется еще много повозиться, пока станут ясными хотя бы основные закономерности».

А пока эти закономерности не прояснились, исследователи вынуждены использовать широкий набор приближенных представлений о ядрах. В этом смысле, как остроумно заметил кто-то из физиков, Храм науки можно было бы назвать Домом моделей.

Сейчас качественное объяснение в рамках той или иной модели получают практически все факты, добываемые экспериментаторами, но количественные соотношения установить удается довольно редко. Да и они еще ни о чем не говорят. По свидетельству самих теоретиков, удачно подобранной формулой с 5 параметрами всегда удается описать 50 произвольно заданных чисел с 5-процентной точностью. Сегодня теория только объясняет то, что делает эксперимент, редко правильно интерпретирует результаты и еще реже отваживается на какие-либо предсказания. Лидером в ядерной физике по-прежнему остается эксперимент.

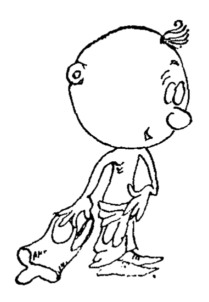
Некоторые теоретики, правда, надеются, что, как только будут правильно заданы силы, действующие между двумя нуклонами, они смогут описать и все свойства ядерной материи.

Однако может оказаться, что выполнение этого условия относительно ядерных сил будет недостаточным для решения всей проблемы атомного ядра. Ведь не удалось же воссоздать свойства простейшей клетки на основе законов молекулярной биологии!

Другие полагают, что точное описание взаимодействия двух нуклонов, особенно при малых расстояниях между ними, в принципе невозможно, и подтверждение этому находят в экспериментах по рассеянию протонов на протонах и нейтронах.

Ну что ж, ситуация вполне научная, ибо, как сказал известный советский физик П. Капица: «Там, где кончаются сомнения, кончается наука».

ПУТЕШЕСТВИЯ В ГЛУБЬ ЯДРА



— Из рассказанного создается впечатление, что физикам довольно легко удалось установить контакт с ядром.

— Смотря что называть контактом. Сотрудники Э. Резерфорда уже в первых экспериментах по превращению азота в кислород имели дело с ядром.

— Ну, такое общение носило совершенно случайный характер. Интересно, как потом ученые разобрались в в том, что такое ядро и какие необходимо применить для его исследования методы?

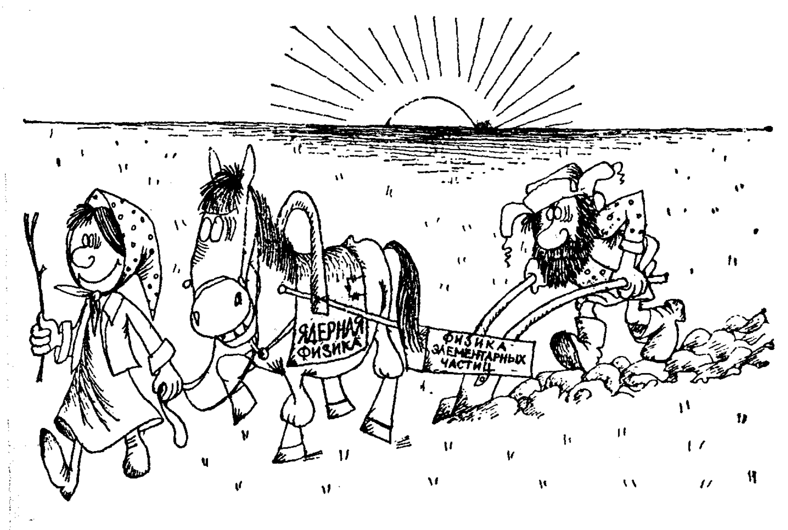
— История «взаимоотношений» ученых и атомного ядра похожа на описанную в романе С. Лема историю попыток землян установить контакт с планетой Солярис; в романе здесь периоды взлета чередовались с периодами падения интереса, разочарования — с надеждами.



Неожиданное открытие почти точечной по своим размерам кладовой атома — атомного ядра — возбудило к этой точке пространства огромный интерес. Но и в течение последующих 20 лет ученые не так уж много смогли разузнать о хранящихся в ней ценностях. Все полученные экспериментаторами сведения сводились в основном к тому, что ядра состоят из протонов и нейтронов, а поведение ядер и некоторые их свойства зависят от числа этих частиц.

Раскрыть главный секрет устройства этой сложной





системы — природу ядерных сил — пока не удавалось. И перед учеными во всей своей необъятной сложности предстала проблема описания ядерных сил.

Столь ограниченные и неутешительные выводы могли охладить пыл не одного энтузиаста ядерной физики. Но наиболее стойкие не унимались и продолжали накапливать сведения об этом «Солярисе» микрокосмоса.

Информация добывалась в основном не активным вторжением с помощью каких-либо микроинструментов в глубины ядерного вещества, а скорее созерцанием тех свойств, что проявлялись при радиоактивном распаде ядер или в тех ядерных реакциях, когда удавалось слегка поворошить нуклоны.

Многие считали, что ядерная физика зашла в тупик. И это было похоже на правду.

Гораздо более интересным и многообещающим представлялось исследование самих элементарных частиц, из которых состояло атомное ядро.

Лет тридцать назад, как только появились первые ускорители протонов высоких энергий, ученым удалось открыть некоторые свойства ядерных сил, проявляющиеся при взаимодействии пары протонов или протона с нейтроном. Но этим, в сущности, и ограничился тогда вклад «элементарщиков» в ядерную физику.

Наблюдения за столкновением нуклонов больших энергий принесли новые неожиданные открытия, и экспериментаторы, увлекшись изучением этих составных частей ядра, вдруг обнаружили, что давно покинули ядерные сферы и витают уже в мире элементарных частиц. Но останавливаться было уже поздно. Они обзавелись мощнейшими ускорителями, овладели искусством создания пучков протонов, нейтронов и таких вторичных нестабильных частиц, как пи- и мю-мезоны, тяжелые К-мезоны, гипероны, и накопили об этих представителях микромира ценнейшую информацию.

Но даже всей совокупности добытых исключительно важных сведений было недостаточно для понимания того, как ведут себя нуклоны в коллективе.

Постепенно выкристаллизовалась идея, что новых сведений о ядерных силах и внутреннем устройстве ядра не получить на стороне, что их надо добывать в самом ядре. На ту же мысль наталкивали и размышления о свойствах ядерного вещества. Если бы ядро было похоже на ящик, наполненный шарами двух цветов, то достаточно было знать, из скольких шаров оно состоит и какого цвета, тогда можно было бы утверждать, что внутренняя структура ядра известна. Но ядро — сложнейшая система из нейтральных и заряженных частиц, без передышки взаимодействующих друг с другом, система, постоянно стремящаяся увеличить свой объем за счет электростатического отталкивания протонов и стягиваемая почти в точку мощным ядерным притяжением. И для нее понятие «структура» оказалось гораздо более глубоким, чем для ящика с шарами.

Разобраться в строении плотного ядерного сгустка нуклонов невозможно, если, например, не знать, как в нем распределены электрические заряды и как распределена в пространстве вообще вся ядерная материя. Физики убедились, что, сколько бы они ни изучали столкновения любых пар нуклонов, они никогда не получат ответы на эти вопросы. Необходимо было снова с еще большей точностью измерить основные параметры ядра: его размер, форму, распределение в нем заряженных протонов и нейтронов, буквально все, что говорит о его структуре и несет на себе отпечаток качеств главного организатора ядерного коллектива нуклонов — ядерных сил.

Опустевшие было наблюдательные посты вокруг «Соляриса» микрокосмоса вновь заполнились сторонниками более тесных контактов с океаном ядерного вещества. Но на этот раз рядом с физиками-ядерщиками были и физики-элементарщики, которые пришли не с пустыми руками, они предложили принципиально новые методы проникновения в мир ядер.

Передовые позиции в исследовании элементарных частиц переместились на крупнейшие ускорители мира. Поэтому в разных странах ученые тех институтов, в которых раньше изучались только элементарные частицы, весь свой мощный арсенал экспериментальных средств стали использовать для изучения атомных ядер.

Узкая пограничная полоса между старой ядерной физикой и молодой физикой высоких энергий стала превращаться в плодотворную область науки, расширяющуюся с каждым годом.

Официальное утверждение этого содружества состоялось в 1963 году. По предложению физиков-теоретиков В. Вайскопфа и Т. Эриксона в Центре ядерных исследований западноевропейских стран в Женеве ученые со-

брались на первую Международную конференцию по физике высоких энергий и структуре ядра.

С тех пор регулярно, через каждые два года физики сообща обсуждают свои последние достижения в этой области исследований микромира, поочередно в Советском Союзе, Западной Европе и США.

Несколько лет назад четвертый по счету «смотр» смешанных сил элементарщиков и физиков-ядерщиков проходил в подмосковном городе Дубне — центре ядерных исследований ученых социалистических стран. Сюда съехалось более трехсот представителей многих лабораторий мира. Среди приехавших были известные ученые, например, профессор Ву Цзянь-сюн из США, которая своими экспериментами впервые доказала, что закон сохранения четности (один из важнейших законов квантовой механики) нарушается в мире элементарных частиц.

Выступая перед коллегами, она сказала, что разрыв между физикой высоких энергий и ядерной физикой уже ликвидирован, и ученые, работающие в этих когда-то резко разделившихся областях исследований микромира, теперь прекрасно понимают друг друга.

Эти слова подтверждала и широта затрагиваемых на конференции тем, и большой интерес ко всем докладам, и, конечно же, бурные обсуждения. Причем не только во время заседаний, но и в перерывах между ними в фойе, за чашкой чая или кофе. Тут и там возникали отдельные группы и пары продолжающих дискуссии, завязавшиеся в зале.

Недостатка в материале для обсуждения не было. Пустив в ход для изучения атомных ядер почти все элементарные частицы, которые удается получать с помощью ускорителей, экспериментаторы увидели ядро в совершенно ином свете.

— Что же нового о ядре они узнали?

— Оно поразило их эффектами не менее сложными, чем мыслящий океан Соляриса — пилота Бартона. Далеко не просто интерпретировать и то, что увидели в ядре экспериментаторы.

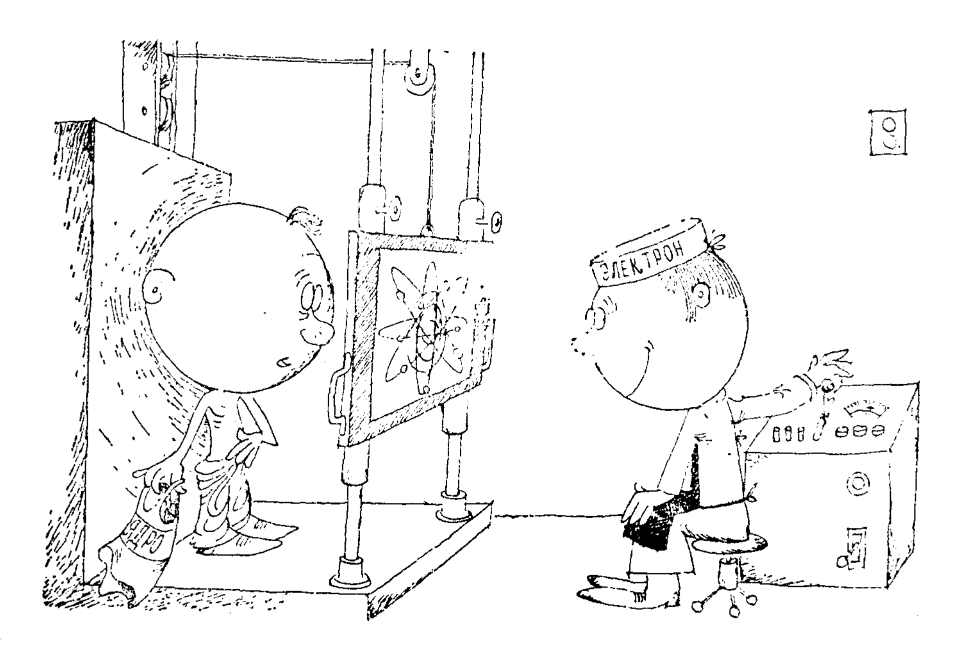
— Не значит ли это, что им тоже не во всем верят?

— Строго установленным экспериментальным фактам нельзя не верить. Даже один-единственный правильно понятый факт постоянства скорости света, как вы помните, указал истинное место всей классической физики.

Дело в другом: как бы каждый метод исследования атомного ядра по-своему ни был хорош, он по-своему и ограничен.

Известно, что все новости о невидимом микромире экспериментаторы получают, так сказать, из «вторых рук». Поэтому объективность, значительность результатов опыта связана с возможностями тех щупов и зондов, которые непосредственно контактируют, например, с атомным ядром.

Зоркость любого внутриатомного инструмента полностью зависит от длины волны, которая ему соответствует по квантовой механике. Объекты меньшие, чем эта главная рабочая часть инструмента, для него неразличимы.



Обнаружить атомные ядра с помощью альфа-частиц удалось именно потому, что эти частицы имели длину волны, как раз совпадающую с размерами ядра.

Но заглянуть внутрь ядер могут лишь такие специальные зонды, как электроны с энергией в десятки миллиардов электрон-вольт, у которых длина волны соизмерима с длиной волны нуклонов. Они просматривают «насквозь» не только атомные ядра, но даже элементарные частицы.

Тем не менее даже резерв зоркости, которым обла-

дают эти электроны, не делает их суждение о структуре ядра совершенно объективным.

Чем талантливее режиссер, тем настойчивее он ищет в каждой пьесе или киносценарии интересующую его тему, а не стремится к холодной беспристрастности в постановке. Единственная и постоянная тема электронов — электромагнитное взаимодействие. Они находят в ядрах только заряженные протоны и почти не замечают в них нейтронов. В результате у физиков создается оригинальное, но несколько одностороннее впечатление об атомном ядре.

И даже при таком предвзятом подходе капля ядерного вещества потеряла те черты идеальности, которые приписывали ей экспериментаторы, истолковывая сведения, полученные от едва различающих ядро альфа-частиц, и приобрела более достоверный вид.

У ядра, оказалось, нет четко очерченной границы. Чем ближе к поверхности, тем все более разреженным становится ядерное вещество. А за радиус ядра принимается расстояние, на котором плотность ядерной материи уменьшается вдвое.

Прошивая ядро со скоростью, близкой к скорости света, электрон успевает с помощью электромагнитного взаимодействия прощупать пространственное распределение протонов в ядре, так сказать, по силе толчка в бок. То есть по углу отклонения от первоначальной траектории.

«Бока» электронов оказались настолько чувствительными, что радиусы ядер удалось измерить с точностью до одного процента, а относительное изменение размеров ядер — даже с точностью в одну сотую процента!

И вот тогда-то четко проявилось небольшое влияние на размеры ядер тонких нюансов в бесконечном поединке электростатического отталкивания и ядерного притяжения. Из двух ядер с одинаковым числом нуклонов больший радиус распределения заряда имело то ядро, у которого было больше протонов.

Вот наглядное подтверждение того, как электростатические силы (их еще называют кулоновские), действующие между зарядами одинакового знака, «выталкивают» протоны к поверхности.

А как заряженные частицы распределены по всей толще ядерного вещества?

В том представлении о структуре атомных ядер, которое сложилось после экспериментов с электронами небольшой энергии, плотность зарядов во внутренней части атомных ядер всегда выступала в качестве постоянной величины. В учебниках она изображалась гладкой, прямой линией, круто спадающей к границе ядра. Быстрые электроны сразу разоблачили эту идеализацию действительности. Как только ученые из новых экспериментальных результатов по рассеянию электронов вычислили плотность зарядов на разных глубинах ядерного вещества, то получили не прямую линию, а кривую с четко выраженными подъемами и спадами.

Экспериментаторы сделали свое дело — задали теоретикам задачу. Теоретикам предстояло теперь дать свое толкование этому важнейшему факту — обнаруженной неоднородности в плотности распределения электрических зарядов в атомном ядре.

Сначала его трактовка не вызывала никаких затруднений. Все единодушно признавали, что, по-видимому, это проявление оболочечной структуры ядер. Но в последнее время все увереннее звучат голоса теоретиков, предлагающих иную гипотезу. Они считают, что электроны помогли вскрыть совершенно новый пласт ядерных свойств. Какой?

Советский физик-теоретик, академик АН СССР А. Мигдал предполагает, что неоднородность распределения зарядов может быть связана с существованием в ядре участков с повышенной плотностью ядерного вещества, не имеющих никакого отношения к нуклонным оболочкам.

Получается так, будто нуклоны «раздираются на части», будучи одновременно членами разных сообществ. Ну что ж, подобная ситуация сплошь и рядом встречается в макромире, когда один и тот же человек является членом и профсоюза, и общества филателистов, и, например, любителей аквариумных рыбок. А может быть, это норма поведения и в микромире?

Давно подмечена одна особенность ядерных сил: они зависят от того, как ориентированы механические моменты количества движения у взаимодействующих частиц. Возможно, ядерные силы создают из особым образом ориентированных протонов и нейтронов совершенно обособленную слоистую, пространственную структуру. В этих уплотненных слоях нуклоны сближаются друг с другом на расстояния меньшие, чем это обычно принято

правилами общественного поведения в ядре. При этом, естественно, должна резко возрасти и плотность пи-мезонов, которыми они обмениваются. Это предполагаемое сгущение пи-мезонов получило название «пи-мезонный конденсат».

Теория пока ничего не говорит о том, насколько стабильно во времени образование «пи-мезонного конденсата»; и все-таки этот новый подход к внутреннему устройству ядер чрезвычайно интересен.

Рассуждая о строении ядерного вещества, физики обычно говорили о протонах и нейтронах, об их пространственном распределении, наконец, о ядерных силах, но не отводили никакой роли в структуре ядра возникающим и тут же исчезающим пи-мезонам — предметам межнуклонного обмена.

Очень может быть, что представление о ядре, состоящем только из протонов и нейтронов, так же мало похоже на настоящее ядро, как препарат клетки, приготовленный для изучения под микроскопом, на живую клетку.

Теоретики предлагают поставить специальные эксперименты по поиску «пи-мезонного конденсата». А. Мигдал считает, что обнаружить его можно, например, по рассеянию электронов больших энергий на ядрах с заранее ориентированными механическими моментами количества движения.

Большой интерес у экспериментаторов вызвало предложение шведского физика-теоретика Т. Эриксона: попробовать зарегистрировать реакцию между влетающими в ядра отрицательно заряженными пи-мезонами и пи-мезонами, принадлежащими ядерной структуре.

Несомненно, электроны подметили много интересного в ядерном веществе, а новые эксперименты с ними принесут, может быть, еще более важные сведения о ядре, хотя и эти сведения всегда будут страдать уже известной нам односторонностью.

— Сложная ситуация. Не заставишь же электроны посмотреть на ядро «другими глазами». Видимо, придется смириться с этим недостатком?

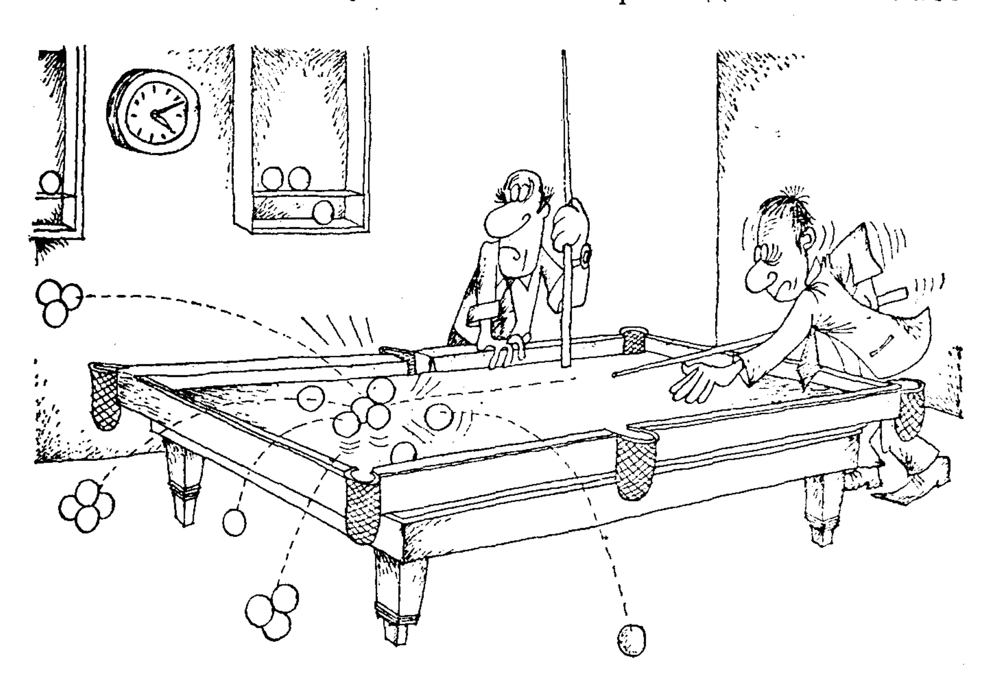
— Конечно, электроны сделали все, что могли. Поэтому экспериментаторы стали посылать в ядра новых наблюдателей.

— Очевидно, это были частицы, в чем-то главном совсем непохожие на электроны?

— На сей раз физики воспользовались сильно взаимодействующими частицами — протонами с большой энергией. Они-то и помогли заметить удивительные особенности в поведении ядерных нуклонов.

От новых «специалистов» по ядру никто не ждал каких-то сенсационных сведений о распределении ядерной материи в пространстве, хотя они и располагали бо́льшими возможностями по сравнению с электронами.

В экспериментах с быстрыми электронами удалось достаточно хорошо прозондировать распределение протонов в ядрах. Подразумевалось, что и нейтроны расположены аналогичным образом, так как они связаны с протонами силами ядерного притяжения. И физикам очень хотелось получить от новых разведчиков — быст-



рых протонов — прямое подтверждение этому предположению. Но основное преимущество ускоренных протонов — ви́дение ядра через призму сильного ядерного взаимодействия — было реализовано далеко не сразу.

Главная тема поначалу звучала очень неуверенно. Неудачной была заданная экспериментаторами форма для ее выражения: рассеяние протонов на ядрах. Протоны рассказывали обо всем увиденном куда менее вразумительно, чем электроны. В общем, результаты не противоречили тому, что уже было известно. В деталях же невозможно было разобраться из-за незнания зако-

нов ядерного взаимодействия. И этот важнейший инструмент исследований в физике элементарных частиц — протоны больших энергий — некоторое время использовался только в роли подсобного при изучении атомных ядер. Так продолжалось до тех пор, пока экспериментаторы не нашли для протонов тот жанр, в котором в полную силу заиграла их главная тема — сильное взаимодействие.

Ядерное вещество в максимальной степени «прозрачно» для протонов с энергией от 500 до 700 миллионов электрон-вольт. Они проникают на любую его глубину, прекрасно различают отдельные частицы и вступают с ними в ядерные реакции. Не рассеяние, а прямое взаимодействие с отдельным ядерным протоном, передача только ему части энергии — вот какая реакция превратила быстрые протоны в особый, незаменимый зонд ядерной структуры. Физики обозначают реакции такого типа символом «p; 2 p», что означает: на ядро падает ускоренный протон и выбивает из него другой. В итоге ядро покидают два протона.

Но не всякий протон, выбитый из ядра, может сообщить что-то интересное о порядках, действующих в ядре, например о его оболочечной структуре. Если в реакцию с влетающим протоном-снарядом вступает все ядро в целом, то вылетающий при этом протон безнадежно обезличен. Он уже не знает, какое состояние и с какой энергией занимал в ядре.

Экспериментаторов же интересует такая реакция, когда протон-снаряд передает энергию непосредственно одному из ядерных протонов. Само ядро уже никоим образом не вмешивается в дележ энергии между двумя нуклонами. Регистрируя энергию двух, покидающих ядро протонов, одновременно попадающих в счетчики, и угол разлета между ними, физики легко могут рассчитать, какую энергию имел ядерный протон до столкновения.

Пятнадцать лет напряженной работы принесли свои плоды — экспериментаторы получили пространственное распределение протонов в различных ядерных оболочках для многих атомных ядер.

В реакции «p; 2p» ученым удалось даже измерить энергию, которую надо затратить для «ядерной ионизации» каждой оболочки, то есть для вырывания из нее протона.

Положение всех нуклонов в обществе под названием «оболочки» было наконец установлено абсолютно твердо. Результаты экспериментов полностью подтвердили расчеты, выполненные по этой модели. Радиус ядра, полученный путем суммирования распределения протонов во всех оболочках, совпал в пределах одного процента с измеренным в опытах по упругому рассеянию электронов.

Но экспериментаторы не закрывали глаза и на другие обстоятельства. Довольно часто быстрый протон передавал часть своей энергии не одному-единственному протону, а выбивал из ядра целую группу крепко связанных нуклонов — кластер, как ее называют физики.

Подобно сгусткам, напоминавшим земные предметы, которые наблюдал пилот Бартон в глубинах океана Соляриса, в ядерном веществе физики с помощью протонов находили образующиеся на короткое время разнообразные сгущения из нуклонов.

Случайно сближаясь между собой, протон и нейтрон иногда создают сгусток, похожий на ядро изотопа водорода — дейтерия, а два нейтрона и два протона ненадолго слипаются в комок, напоминающий альфа-частицу — ядро гелия-4. Отличаются эти временные образования от обычных ядер такого же типа лишь весьма малыми размерами.

Эта динамическая, кластерная структура ядра представляет собой не что иное, как возникновение сверхплотных комочков нуклонов в сравнительно однородном ядерном веществе.

В неумело сваренном киселе плотные комки вполне можно считать косвенным доказательством того, что это блюдо может быть приготовлено и более густым.

А не может ли в принципе быть погуще и ядерное вещество?

Казалось бы, может. Ядерные силы притяжения в состоянии заставить все ядерные частицы коллапсировать, сжиматься в один сверхплотный комок с размерами порядка их радиуса действия. Однако нуклоны только изредка реализуют эту возможность, образуя кластеры. Ученые объясняют этот интереснейший и очень важный факт, в частности, тем, что на очень близком расстоянии, приблизительно равном половине радиуса действия притяжения, нуклоны начинают с огромной силой отталкиваться.

Эта идея впервые высказывалась уже в конце 30-х, в 40-х годах. Тогда ей уделялось очень мало внимания, так как ученые считали, что она противоречит представлению о простой структуре элементарной частицы. Но когда это представление развеялось «как дым, как утренний туман», и потрясенные своими открытиями физики вынуждены были даже отказаться от использования эпитета «элементарные» в первую очередь по отношению к протонам и нейтронам, то идея об отталкивании между ними на малых расстояниях обрела права гражданства. Эту гипотезу подтверждали и результаты экспериментов по рассеянию протонов на протонах.

Итак, плотность ядерного вещества не произвольно задана природой, а является результатом динамического равновесия между силами притяжения, словно обручами стягивающими всю систему нуклонов, и сопротивлением изнутри, которое препятствует дальнейшему уменьшению объема.

Тем более интересны случаи нарушения этого обычного состояния ядерного вещества — возникновение сверхплотных сгущений нуклонов. Они дают прямую информацию о поведении протонов и нейтронов на сверхблизких расстояниях, где, по-видимому, проявляются еще более мощные, чем притяжение, силы отталкивания между частицами. Никаким другим способом получить аналогичные сведения пока невозможно.

В ядерных кластерах нуклоны сближаются, так сказать, добровольно. А громадная энергия, которая требуется для сближения свободных нуклонов на расстояние, сравнимое с радиусом действия отталкивания, способствует рождению множества новых частиц. И момент сближения сопровождается такими посторонними явлениями, что докопаться до свойств ядерных сил практически невозможно.

Превращение реакции выбивания кластеров протонами больших энергий в инструмент исследования структуры ядра и природы ядерных сил — в значительной мере заслуга ученых Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в Дубне.

— Да, изучать ядро проносящимися сквозь него со скоростью света частицами дело, вероятно, довольно хлопотное. А нельзя ли это делать более спокойным, что ли, способом?

— Такая возможность появилась только после откры-

тия особых, короткоживущих атомов, непохожих на обычные.

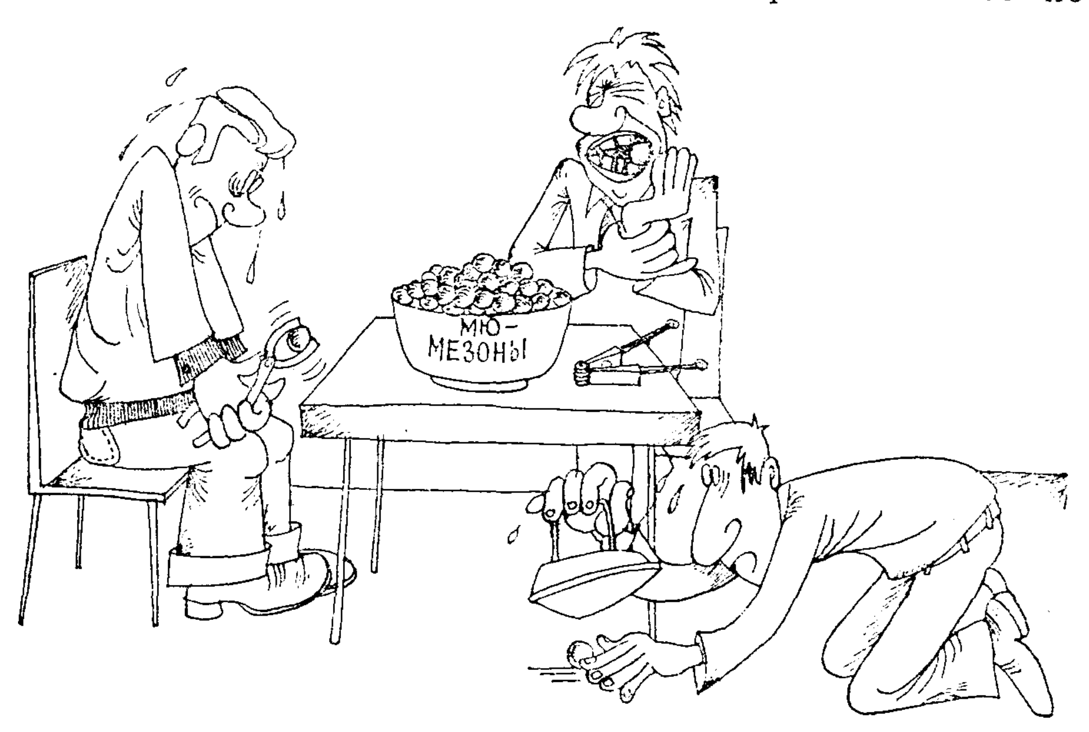
— Что, в таких атомах ядро само раскрывает свои тайны?

— Нет, ученые исследуют нуклонный коллектив с помощью частиц — «ядроходов», которые совершают мягкую посадку на ядро и даже на какое-то время проникают в его недра.

Роль «ядрохода» была поручена легкой элементарной частице с единичным отрицательным электрическим зарядом — мю-мезону.

За те 40 лет, что прошли со дня первого знакомства ученых с этой частицей, так и не удалось выявить ее особый талант, понять, в чем ее неповторимость и для чего она вообще нужна микромиру.

Злые языки утверждают, что ничего оригинального в ней нет; что это просто электрон с массой, в 210 раз большей. В это, конечно, трудно поверить. «Ничто не



происходит без достаточного основания», — писал М. Ломоносов. И наука на каждом шагу подтверждает эти слова. Но, видимо, в случае с мю-мезоном «основания» эти лежат довольно глубоко, и до них не так легко добраться. И пока теоретики продолжают свои попытки «раскусить» мю-мезон, экспериментаторы уже давно используют его в эпизодических, «проходных» ролях при

исследовании микромира. Роль «ядрохода» — одна из наиболее серьезных.

Профессор Ву Цзянь-сюн на конференции в Дубне сказала, что, потеряв новизну для физики элементарных частиц, мю-мезоны приобрели важное значение в качестве инструмента для изучения атомных ядер.

Этот любопытный инструмент возникает в конце цепочки ядерных реакций, следующих одна за другой. Сначала протоны, разогнанные на мощном ускорителе, со всей силой ударяются о кусок вещества — мишень, и рождают новые частицы пи-мезоны. А пи-мезоны, распадаясь, рождают более легкие мю-мезоны.

Но сам по себе мю-мезон еще не инструмент. «Ядроходом» он становится лишь после того, как образует необычный, экзотический, атом.

Слова «экзотический атом» звучат на первый взгляд довольно странно. Ну какая может быть экзотика в атомах, все закоулки которых давным-давно исследованы и переобследованы?

В наше время даже школьники знают, что атомы состоят из электронов, нейтронов и протонов.

Строение атомов, действительно, понятно настолько хорошо, что физики способны по желанию как разрушать их, так и создавать новые.

Первым искусственно созданным экзотическим атомом стал наилегчайший атом позитрония. Теоретики всерьез заговорили о нем сразу после открытия в 1934 году электрона с положительным электрическим зарядом — позитрона. Нейтральный, как и все атомы, атом позитрония, в котором вокруг позитрона должен был вращаться один электрон, казался столь реальным, что получил свой химический символ еще до открытия его экспериментаторами в 1951 году.

Больше четверти века ученые имеют дело с разными искусственными атомами и настолько привыкли к этой мгновение существующей (позитрон живет миллионные доли секунды) экзотике, что подчас обычные природные атомы кажутся им производными от этих поденок.

Новизна экзотического мю-мезоатома в том, что в нем, помимо электронов, протонов и нейтронов, присутствует еще и мю-мезон. Отрицательно заряженный мезон — желанный гость атома, точнее, гость ядра. Это оно своим большим положительным электрическим за-

рядом, как магнитом, притягивает остановившийся в веществе мю-мезон.

Не имея сил отказаться от настойчивого приглашения, мезон садится на одну из самых внешних, расположенных далеко от ядра электронных орбит. Но положение гостя не избавляет мезон от подчинения действующим в атоме квантовым законам. Радиус околоядерной орбиты любой частицы обратно пропорционален ее массе — гласит это правило. Оно предписывает мезону искать свое место на орбитах, которые находятся в 200 раз ближе к ядру, чем электронные.

Ничего не поделаешь, против квантовой механики не пойдешь; и приходится мезону круто пикировать. Перескакивая с одной орбиты на другую, он быстро приближается к центру атомной планетной системы, к ядру.

В атомах средних по массе химических элементов мю-мезон, находясь на самой близкой к ядру орбите, буквально чиркает по его поверхности. А в атоме свинца он не только совершает мягкую посадку на ядро, но даже глубоко погружается в ядерное вещество.

Уже говорилось, что в микрокосмосе все события совершаются в чрезвычайно сжатые сроки. И мю-мезон — ядроход существует намного меньше секунды. Однако по сравнению с ядерным масштабом времени это целая вечность. Поглощенный пучиной плотного ядерного океана мю-мезон, прежде чем исчезнуть в реакции взаимодействия с протоном, успевает сделать миллионы миллионов оборотов.

Как же удается мю-мезонам так свободно проникать в ядро и кружиться там, не теряя своей самостоятельности?

Повинны в этом опять-таки квантовые законы. Они утверждают, что проницаемость или непроницаемость в микромире зависит не от твердости или мягкости преграды, как мы к тому привыкли, а от наличия или отсутствия вакантных мест в определенных квантовых состояниях.

Пулей не пробить толстую броню; и мы утверждаем, что она непроницаема. Но если пуля вдруг превратилась бы в квантовый объект, она легко проникла бы в нее, потому что в этом случае все квантовые состояния в броне для пули свободны. Свободны и для мю-мезона все состояния в ядерном веществе. Легко перемещаясь в нем, мю-мезон «не торопясь», в спокойной обстановке

фиксирует форму ядра, его размер, пространственное распределение в нем протонов и передает все эти сведения по «каналу мезорентгеновской связи» ученым.

Этот «канал» работает непрерывно с момента образования мю-мезоатома до захвата мезона ядром. Перескакивая с одной своей орбиты на другую, расположенную глубже в атоме, мезон, следуя квантовым законам, испускает рентгеновское излучение. Физики называют его мезорентгеновским, чтобы ясно было, кому оно обязано своим происхождением.

Мю-мезон, как и электрон, не подвержен сильному взаимодействию. Его общение с ядром в основном сводится к взаимодействиям электромагнитному и слабому. И чем ближе он подходит к центру атома, тем мощнее становится воздействие на него ядерного скопища электрических зарядов.

Мезорентгеновские фотоны, которые мю-мезон испускает при перескоках между несколькими самыми глубокими последними орбитами, несут в себе все богатство его электромагнитных «впечатлений» от ядра. Очень важно уметь «выжать» эти впечатления всего из двух измеряемых на опыте характеристик рентгеновского излучения: энергии и интенсивности.

Вот как находится, например, теоретическая зависимость энергии этого излучения от размера ядра в шутливом изложении самих физиков.

Сначала теоретик воображает себе ядро в виде некоего заряженного облака. И не только в голове, но и на бумаге, в математическом виде. Подобным же образом движущийся в ядре мю-мезон представляется ему в виде размазанного желеподобного объекта. А когда это облако и желе, сдобренные такими «приправами», как теория относительности и спин (механический момент количества движения), «засыпаются» в электронную счетную машину, то наружу выскакивает долгожданный результат: зависимость энергии рентгеновских лучей от радиуса ядра.

Первые же эксперименты с мезоатомами, выполненные четверть века назад, внесли чрезвычайно важный вклад в ядерную физику. По энергии мезорентгеновских лучей впервые с большой точностью физикам удалось «измерить» тяжелые ядра. Их радиусы оказались на 30 процентов меньше тех значений, что фигурировали в тогдашних таблицах и учебниках.

И сейчас этот метод не уступает по точности методу измерения радиуса ядер по рассеянию электронов больших энергий. Кроме того, мезонный инструмент обходится ученым дешевле, чем гигантский ускоритель электронов. Но сравнение этих двух методов теряет всякий смысл, когда речь идет об исследовании деталей структуры ядра.

Длительный контакт мю-мезона с ядерным веществом приводит к неожиданным последствиям. Быстро выдергивая лист бумаги из толстой стопки, мы не нарушаем расположения остальных листов, вытягивая же его медленно, можно сдвинуть с места и всю стопку. Электрон, проскакивая через ядро, не успевает повлиять на распределение в нем протонов. А мю-мезон, двигаясь по орбите, расположенной в самом ядре, немного искажает истинное расположение зарядов. Это перераспределение нуклонов, в свою очередь, воздействует на мю-мезон, и он становится регистратором уже новых, изменившихся свойств ядерного вещества.

Теоретики уже различают некоторые виды этих очень небольших, очень тонких, но чрезвычайно важных для исследования структуры ядра эффектов, которые накладывают свой отпечаток на мезорентгеновское излучение, «просвечивающее» ядро.

— Интересно, напоминает ли эта рентгеновская установка для просвечивания ядра ту, которая работает в обычном рентгеновском кабинете?

— Нет. Физикам не нужны источники рентгеновских лучей. Они регистрируют уже готовые рентгеновские фотоны, испускаемые экзотическими атомами, и обходятся поэтому только приемниками лучей. В экспериментальном зале ускорителя такой приемник даже трудно заметить.

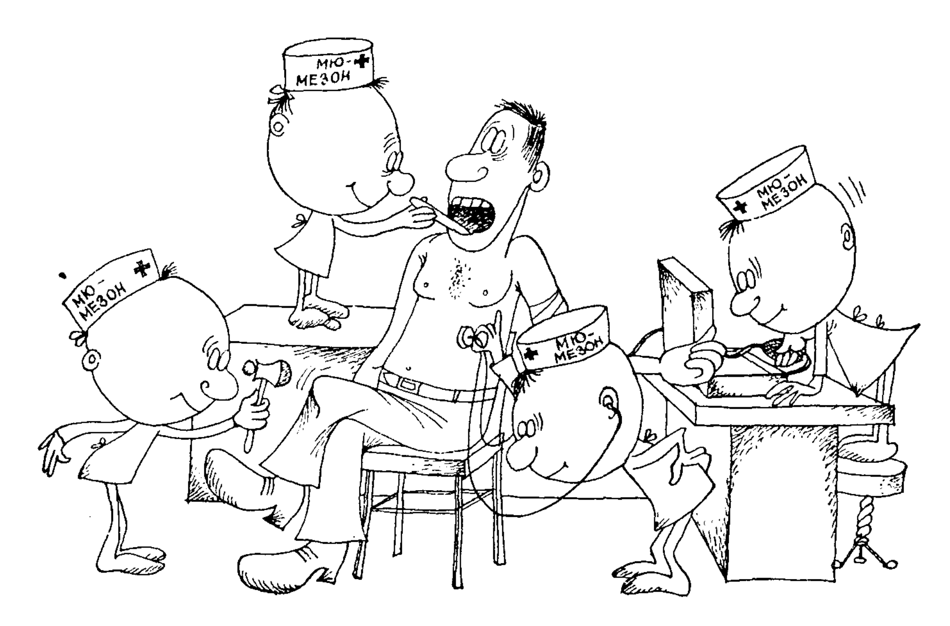
— Значит это совсем простая установка?

— Простая по форме, но сложная по содержанию. Все своеобразие экспериментов с экзотическими атомами заключается не в создании необычной, громоздкой аппаратуры, какая необходима физике элементарных частиц, а в достижении чрезвычайно высокой точности при измерении энергии. Главная забота экспериментаторов состоит в том, чтобы не потерять ни одного бита информации, закодированной в энергии и интенсивности мезорентгеновского излучения.

Для этой цели ученым не нужны ни большие магни-

ты, ни громадные баки черенковских счетчиков, с помощью которых выделяют частицы, движущиеся почти со скоростью света. Энергия рентгеновских лучей относительно мала. В атомах разных элементов она меняется в интервале всего лишь от единиц до сотен и тысяч килоэлектрон-вольт. Наиболее чутким прибором для регистрации квантов такой энергии зарекомендовал себя германиевый полупроводниковый детектор.

В обычном германиевом счетчике при всем желании почти невозможно найти ничего такого, что могло бы



поразить наше воображение. Состоит он из небольшого цилиндрика объемом в несколько десятков кубических сантиметров, сделанного из химически чистого элемента германия. А вот изготовление этого счетчика требует настоящего искусства. В кусочек германия с помощью очень сложной технологии вносится небольшое количество элемента лития. Только после этой процедуры германий приобретает необходимые для прибора свойства.

Но и сам германиевый цилиндрик с вкрапленным в него литием тоже еще не счетчик. Вторая часть прибора — очень сложная, чувствительная и чрезвычайно стабильно работающая электронная аппаратура.

Весь германиевый кристалл постоянно находится в электрическом поле. Когда через цилиндрик пролетает ионизирующая частица, на ее пути возникают свободные

электроны, вырванные из кристаллической решетки, и оставшиеся в ней положительно заряженные «дырки». Под воздействием электрического поля и те и другие быстро перемещаются к электродам, которые отвечают на их появление электрическим сигналом.

Высокая плотность вещества полупроводникового счетчика и очень малая энергия ионизации, в десять раз меньшая, чем та, которая требуется для ионизации, например, в газе, делают его просто незаменимым для измерения энергии рентгеновского излучения.

Надо сказать, что точно такую же аппаратуру и те же мезоатомы ученые используют теперь и для других целей. Например, для изучения изменений химического состава в живых организмах. Мезорентгеновский свет со своими спектральными линиями так же специфичен для каждого химического элемента, как и обычный.

Живое и неживое состоит из одного и того же стандартного набора элементов. И вполне закономерно, что результаты исследований физиков в мире атомов находят применение в биологии и медицине. Облучение мю-мезонами позволяет при минимально возможном радиационном воздействии на человека проводить химический экспресс-анализ для медицинской диагностики.

Во многих институтах мира сейчас строятся, а в некоторых уже и работают ускорители, предназначенные не для достижения рекордных энергий ускорения протонов, а для получения рекордных по интенсивности пучков пи- и мю-мезонов. Они так и называются «мезонные фабрики». Большая интенсивность мезонного пучка поможет экспериментаторам достичь более высокой ступени точности измерения и энергии мезорентгеновского излучения.

Жизнь идет вперед. И то, что вчера казалось наивысшим достижением, сегодня уже теряет какую-то часть своих достоинств. Германиевый детектор, несмотря на свои превосходные качества, практически достиг потолка точности. Возникла новая идея — использовать на ускорителях совершенно иной способ измерения энергии рентгеновских квантов, способ, при котором экспериментаторы, как бы забывая об энергии, занимаются только прецизионным измерением угла рассеяния этих квантов от плоскости кристаллической решетки.

Какое же отношение имеет кристаллическая решетка к энергии мезорентгеновского излучения?

На первый взгляд никакого. Но физики, изучающие свойства обычных атомов, давно применяют для исследования атомных спектров кристалл-диффракционные гамма-спектрометры. Главную свою задачу — определение энергии электромагнитного излучения — экспериментаторы переложили, так сказать, «на плечи» кристалла кварца, основную часть этого прибора. Квант излучения определенной энергии, падая на плоскость кристаллической решетки кварца, с максимальной интенсивностью отражается под определенным углом. Таким образом энергию рентгеновских или гамма-квантов с абсолютной точностью как бы устанавливает сам закон природы — закон взаимодействия этих квантов с внутренней структурой кристалла. А физикам остается лишь найти величину угла, на который с максимальной интенсивностью отражается мезорентгеновское излучение. И зависит она от энергии излучения и расстояния между кристаллическими плоскостями.

Правда, на долю создателей прибора остается не так уж мало трудностей. Требуется ювелирное исполнение механических частей прибора и фантастическая точность (до сотых долей угловой секунды!) при измерении довольно больших углов. Необходимо поддерживать и жесткий температурный режим — до одной сотой градуса. Но, выполнив все эти условия, исследователи атомных ядер получают прибор, который измеряет энергию рентгеновских квантов в 100 раз точнее, чем самый удачный полупроводниковый счетчик.

— А насколько резка граница, отделяющая ядро от пустоты микрокосмического пространства?

— Переход между ядерным веществом и вакуумом довольно плавный. На расстоянии среднего радиуса ядра плотность нуклонов всего в два раза меньше, чем в центральной части. Поверхностный слой ядерного вещества составляет более трети радиуса ядра! А дальше простирается область еще более разреженная — ядерная стратосфера.

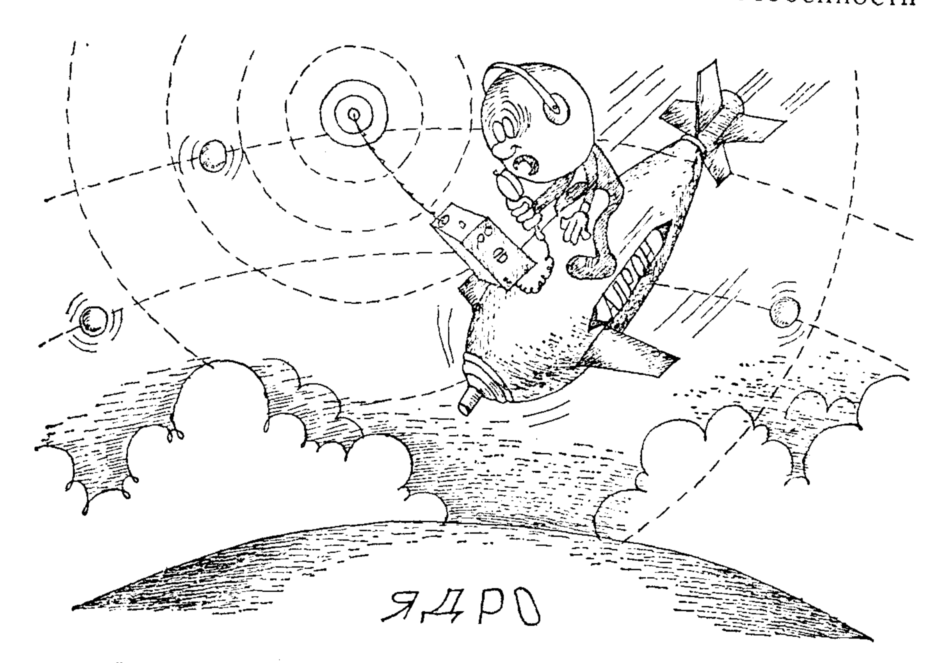
— Наверное, в этом слое ядра, где частиц совсем мало, уже ничего интересного не происходит?

— Не совсем так. Поверхность ядра столь же богата разнообразными проявлениями свойств ядерных сил, как и его глубины.

Несколько страниц посвящает С. Лемм в романе «Солярис» описанию фантастических волн и смерчей на

поверхности мыслящего океана, неистощимое буйство которых как-то отражало его глубоко скрытую и непонятную землянам деятельность. Целую поэму можно написать и о поверхности океана ядерного вещества.

Теоретики предполагают, что в поверхностной, более разреженной области ядра протоны и нейтроны ведут себя, так сказать, более раскованно. Здесь менее эффективно действует жестко регламентирующий их поведение в плотной центральной части принцип Паули. Именно на поверхности возможно подметить такие особенности



ядерной материи, которые никогда не обнаружить в центральных областях, где плотность велика.

Ближе к краю ядра число нуклонов иногда убывает равномерно. Тогда говорят, что у ядра гладкая поверхность. А на «бугристой» нейтроны и протоны сбиваются в небольшие сгустки. У теоретиков есть некоторые соображения относительно того, что в ядерной «бахроме» протоны и нейтроны ненадолго слепляются в обычную альфа-частицу. Альфа-сгущения возникают и вновь исчезают по мере того, как отдельные нуклоны, из которых они состоят, двигаясь по индивидуальным орбитам, внезапно появляются на поверхности ядра и опять ныряют в его глубины.

Модель оболочек предсказывает скопление альфа-

частиц на поверхности ядра от 100 процентов в легком ядре лития-6 до одного процента для ядра кальция-40. Но как обстоит дело на самом деле, еще неясно. Результаты некоторых экспериментов кажутся весьма прозрачным намеком на то, что альфа-частиц на поверхности гораздо больше, чем это следует из модели оболочек. Возможно, это так, и тут уж ничего не поделаешь. Как говорил А. Эйнштейн: «Все, что мы знаем о реальности, исходит из опыта и завершается им».

Однако и поверхностный слой, за толщину которого принимают расстояние по радиусу от точки, где плотность равна девяти десятым от значения плотности в центре, до точки, в которой она падает до одной десятой, еще не самый край ядра.

До нуля плотность ядерного вещества спадает на довольно большом расстоянии от центра ядра. Кажется, что эта далекая окраинная область не может поразить чем-то необычным, ведь там и частиц-то почти не осталось.

Но мы знаем, как много дали ученым исследования «атмосферы» и «стратосферы» Солнца. Сколько интересных и важных явлений было открыто именно в этой части нашего светила. В «ядерной стратосфере» плотность материи в 20 раз меньше, чем во внутренней области, и именно здесь может проявиться действие таких законов, которые могли бы остаться незамеченными при изучении только сердцевины атомного ядра. Из каких же частиц состоит «стратосфера» ядра?

Поверхностные области атомных ядер почти не поддаются теоретическому анализу, и окончательное слово остается за экспериментом. Но многие физики предполагают, что, например, тяжелые атомные ядра должны иметь поверхностный слой, состоящий преимущественно из нейтронов, этакое «нейтронное галло». Кстати, этому не противоречат и данные по рассеянию быстрых электронов.

Галло, возникающее иногда вокруг Солнца перед резкой переменой погоды, можно увидеть невооруженным глазом, а как рассмотреть нейтронный ореол вокруг ядра?

До того как экспериментаторы научились ускорять протоны до энергии в несколько десятков миллиардов электрон-вольт, нечем было зондировать эти полупустынные окрестности ядра. Теперь такую возможность представляют вторичные нестабильные частицы, которые рождаются при столкновении сверхбыстрых протонов с веществом.

На международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра, которая проходила в 1971 году в Дубне, и на конференции, состоявшейся летом 1975 года в Соединенных Штатах Америки, часто можно было услышать слова: «адронные атомы».

«Адронами» физики называют все элементарные частицы, способные к сильному взаимодействию. Это их, так сказать, родовое название. Эпитет «адронные» получили такие экзотические атомы, которые, кроме протонов, нейтронов и электронов, содержат еще и адроны: пи-мезоны, К-мезоны или тяжелые гипероны. Адронные атомы, как говорится, просто созданы для прощупывания самых отдаленных от центра участков атомных ядер.

Механизм запуска адронов на орбиту вокруг ядра аналогичен запуску мю-мезонов и гораздо проще запуска искусственных спутников Земли. (Конечно, при условии, что под рукой есть мощнейший ускоритель протонов и сложная система формирования пучков вторичных нестабильных частиц.) При этом обычные атомы вещества, в котором останавливаются отрицательно заряженные пи-мезоны, К-мезоны или гипероны, превращаются в адронные, если эти нестабильные частицы становятся спутниками их ядер.

Экзотические атомы мимолетны, как мы уже говорили, и весьма своеобразны. Самую интересную, уникальную информацию они дают не в момент захвата адрона ядром, сопровождающегося катастрофой, взрывом ядра, а буквально за одно мгновение до этого события, когда взаимоотношения между ними строятся еще на полутонах.

Атомные орбиты тяжелых адронов расположены еще ближе к ядру, чем орбиты легких мю-мезонов. Но добраться до самых глубоких из них адронам не удается. Экспериментаторы узнают об этом по энергии тех рентгеновских сигналов, которые поступают при перескоках частиц с одной орбиты на другую.

Первые порции этого излучения приносят только электромагнитные впечатления от взаимодействия пи-, К-мезонов или гиперонов с ядром. Короткодействующие ядерные силы еще не чувствуют присутствия в атоме

6*

достойного партнера для сильного взаимодействия. Но стоит адрону войти в область «ядерной стратосферы», как тотчас включается сильное взаимодействие, которое перекрывает все остальные. Адрон перестает ощущать атом и общается только с протонами или нейтронами самой периферии ядра. А мю-мезон эту область проскакивает, совершенно не замечая нуклонов, поскольку его удел слабые взаимодействия.

В популярной песенке поется, что «одна дождинка — еще не дождь, одна снежинка — еще не снег». Но для адронов редкие нуклоны ядерной стратосферы уже ядро. И оно тотчас показывает свой характер. Аппетит ядра к сильно взаимодействующим частицам столь велик, что пи-мезон исчезает уже с пятой или шестой орбиты, диаметр которой еще в десять раз больше размера самого ядра. Ну а К-мезон захватывается ядром и того раньше.

Последний сигнал, принимаемый экспериментаторами от адронного атома, последняя порция рентгеновского излучения наиболее ценна, потому что несет максимальную информацию о характере взаимодействия пи-мезона, К-мезона или гиперона с ядром и, что очень важно, о плотности протонов и нейтронов в самых отдаленных, поверхностных, районах ядра.

Это уникальная возможность проверить, а вернее — испытать на деле многие представления, гипотезы и формулы, предлагаемые теоретиками для описания ядерных взаимодействий. Примеряя свои математические построения к тому экспериментальному материалу, что дают экзотические атомы, ученые подбирают наиболее подходящие значения для произвольных параметров, входящих в формулы.

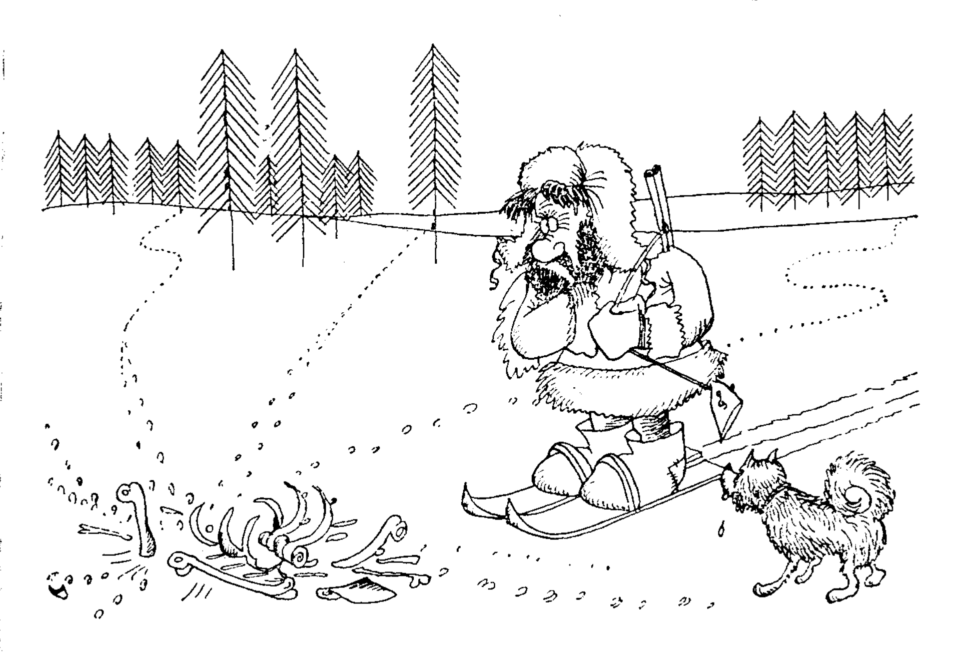
— Судя по всему, «посторонние» сильновзаимодействующие частицы не могут так же долго гостить в ядре, как, например, мю-мезоны. Значит ли это, что физики никогда не получат обстоятельного рассказа о ядре от адрона-очевидца?

— В общем, да. Но, к счастью, в микромире нет правил без исключений. Обнаружены такие ядра, где вместе с протонами и нейтронами отлично «уживается» нейтральный лямбда-гиперон — частица не без «странностей», но, что самое главное, способная к сильному взаимодействию с нуклонами.

В 1953 году польские ученые М. Даныш и Е. Пневский изучали взаимодействие космических лучей с ядрами фотоэмульсий. В то время это был единственный способ проникнуть в мир огромных энергий, где каждое столкновение заканчивалось расщеплением ядра и рождением новых частиц.

В методе фотоэмульсий используются только два прибора: сделанный руками человека микроскоп и прибор удивительно высокой чувствительности, созданный самой природой, — человеческий глаз.

По перепутанным следам зверей на заснеженной поляне опытный охотник воссоздает картину борьбы не на



жизнь, а на смерть, полную динамизма и ярости. Линии, прорисованные в эмульсии следами (треками) заряженных частиц, полны движения для рассматривающего их физика и говорят об интересных событиях в микромире.

На картине, застывшей в поле зрения микроскопа, наметанный глаз легко различает тонкий непрерывный след космической частицы большой энергии, угодившей прямо в тяжелое ядро вещества эмульсии. Подобно молнии, которая шутя расщепляет ствол дерева-великана, она раскалывает ядро, из которого высыпаются частицы.

Глаз видит как бы звезду, характерный признак взрыва ядра: из одной точки эмульсии расходятся сразу несколько лучей — треков заряженных частиц.

Польские физики при просмотре облученных в космических лучах фотоэмульсий заметили, что в некоторых звездах среди прочих лучей встречается один совершенно необычный. Необычность следа не в том, что толщина его менялась по мере удаления от центра, а совсем в другом. Характер трека не оставлял сомнений в том, что этот осколок вдребезги разлетевшегося тяжелого ядра эмульсии являлся ядром какого-то легкого элемента. Непонятным было его дальнейшее поведение.

Обычно, быстро обрастая электронами, заряженное ядро все меньше ионизировало вещество эмульсии, а, превратившись в нейтральный атом, окончательно «заметало» свой след. В редких же случаях это ядро тоже взрывалось, образуя небольшую вторичную звезду.

Физики были чрезвычайно удивлены тем, что, казалось бы, ни с того ни с сего легкое ядро испытывало катастрофу, да еще буквально в двух шагах от первого. Создавалось впечатление, будто ядро-осколок содержало в себе бомбу замедленного действия.

Бесстрастный свидетель — фотоэмульсия — объективно зафиксировал все детали этого события. По толщине следов, по их длине можно было узнать, какие частицы и с какой энергией вылетели при взрыве легкого ядра. Проще всего было предположить, что вторая звезда — это результат взрыва осколка, «перегретого» в момент образования. Но в таком случае он никак не мог бы иметь столь длинный пробег в эмульсии и столь долгое время жизни — порядка 10^{-12} секунды!

Проведя анализ этого странного события, М. Даныш и Е. Пневский сообщили об открытии первого гиперядра — необычного «гибрида» атомного ядра и нестабильного тяжелого лямбда-гиперона.

Нейтральный лямбда-гиперон рождался в момент удара космической частицы о первое ядро и незаметно для протонов и нейтронов приживался в ядре-осколке. Через 10^{-12} секунды нестабильный гиперон распадался на протон и пи-мезон с отрицательным электрическим зарядом. Эти, а также вторичные частицы, выбиваемые ими из ядра, и прочерчивали в эмульсии лучи второй звезды.

Гиперядро представляет собой уникальную возможность для физиков наблюдать, как довольно долгое время (по сравнению с ядерным) посторонняя сильно взаимодействующая частица сосуществует с обычными протонами и нейтронами. В этом сосуществовании все странно и многое непонятно до сих пор. Не без странностей и сама непрошеная ядерная квартирантка. Ученые так и называют гипероны «странными» частицами. Рождаясь и исчезая в сильных взаимодействиях, гипероны как-то умудряются просуществовать гораздо дольше положенного им, законного мгновения ядерного времени, равного 10^{-22} секунды.

Странно и другое. С одной стороны, нейтроны и протоны как будто не замечают присутствия в ядерном веществе гиперона, словно он для них невидимка. Но, с другой стороны, эта частица легко приживается в ядре только благодаря тому счастливому обстоятельству, что между гипероном и нуклонами действуют обычные мощные силы ядерного притяжения. Так можно ли говорить о том, что нейтральный лямбда-гиперон попадает в ядро никем не замеченный?

По-видимому, по обоюдному соглашению квартирантка получает все права, какие имеют и постоянные жильцы: ее энергия связи приблизительно такой же величины, что и у других нуклонов. Но в то же время эта частица ловко увиливает от выполнения некоторых правил внутреннего ядерного распорядка.

Один гиперон в ядре не подчиняется принципу запрета Паули, как и одна квантовая пуля в броне или один мю-мезон в ядре. «Это колоссальное преимущество для проверки наших представлений о структуре ядра», — сказал профессор Е. Пневский.

Ученые считают, что наиболее перспективны именно те исследования, в которых изучаются ядра, находящиеся в условиях, отличающихся от стандартных. Сравнение таких свойств гиперядер, как время жизни, возможные квантовые состояния и другие, с такими же свойствами обычных ядер даст богатую информацию и о ядерных силах, и о новых сторонах в строении ядра.

Но физика гиперядер не могла развиваться до тех пор, пока в качестве основного источника гиперонов использовались космические лучи. Слишком редки были случаи рождения гиперядер. Сейчас их создают на мощных ускорителях протонов в пучках отрицательно заряженных К-мезонов. В реакции, которую в 1963 году предложил для получения гиперядер советский ученый профессор М. Подгорецкий, тяжелый К-мезон, сталкиваясь с ядром мишени, захватывается одним из его нейт-

ронов. При этом рождается нейтральный лямбда-гиперон, который приживается в ядре, и пи-мезон. Эта ядерная реакция в основном и штампует гиперядра по сей день.

Известно уже около двадцати таких необычных ядер. Но в результате систематических исследований, к которым приступили ученые во многих известных лабораториях, наверняка будут открыты новые группы подобных ядер с совершенно новыми свойствами.

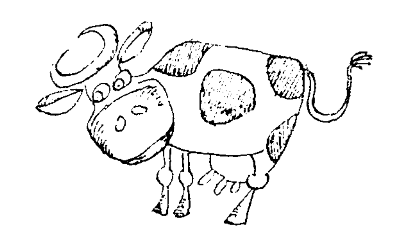
А пока о гиперядерной физике приходится говорить, оперируя в основном глаголами будущего времени. Это одна из быстро развивающихся, интереснейших областей науки микромира, у которой, правда, гораздо больше потенциальных возможностей, нежели реальных достижений. И все же экспериментаторы уже обнаружили несколько гиперядер, которые содержат не один нейтральный лямбда-гиперон, а целых два. Но и это не предел. Теоретики предсказывают, что на вновь строящихся ускорителях, так называемых нуклотронах, разгоняющих до высоких энергий атомные ядра, можно будет получать экзотические ядра с еще большим числом гиперонов. Такие сверхстранные ядра должны быть более плотными, поскольку при добавлении к ним лямбда-гиперонов их радиусы тем не менее не увеличиваются. Исследование такого необычного ядерного вещества интересно и само по себе, и с точки зрения астрофизики.

Советские астрономы В. Амбарцумян и Т. Саакян еще в 1960 году выдвинули гипотезу о существовании особой формы звездного вещества — вещества, содержащего, кроме нуклонов, еще и гипероны.

Возможно, настанет время, когда гиперонная физика позволит ученым «хватать с неба звезды» и изучать их в лаборатории. Экзотические ядра, содержащие несколько гиперонов, могут служить микроскопической, короткоживущей «пробой» звездного вещества.

ЯДРА ВО ВСЕЛЕННОЙ И У НАС ДОМА







— Выходит, что ядерное вещество можно нафаршировать разными частицами? А как в микромире обстоит дело с рационализацией? Если между протонами и нейтронами действуют одинаковые ядерные силы, то не существует ли ядер, построенных, например, из одних нейтронов?

— Природа — гениальный рационализатор. И когда в этом возникает необходимость, она действительно создает нейтронное вещество.

Шестого августа 1967 года молодая ассистентка профессора Э. Хьюиша, наблюдая с помощью радиотелескопа за созвездием Лисички, зарегистрировала необычный сигнал: на ленте, выползающей из-под скоростного самописца, были четко видны с удивительной строгостью повторяющиеся во времени всплески. Это знаменательное событие произошло в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета; в той самой лаборатории, где Дж. Дж. Томсон впервые доказал делимость атома, обнаружив элементарную частицу — электрон; лаборатории, тесно связанной с именем Э. Резерфорда.



Никто и никогда раньше не принимал из космоса столь странных сигналов. Они до жути походили на тысячу раз описываемые писателями-фантастами позывные внеземных цивилизаций. Казалось бы, астрономы должны были поскорее оповестить весь мир о своем открытии

и попытаться расшифровать закодированную в таинственных импульсах информацию о далеких мирах. Но ученые — странные люди. И наиболее добросовестные из них кажутся вдвойне странными.

Английские астрономы прежде всего начали сомневаться в полученном результате и придумывать самые неинтересные, самые скучные причины появления необычных импульсов.

Прежде чем размышлять о внеземных цивилизациях, авторы открытия предпочли сначала проверить версию о помехах, связанных с нашей, земной, цивилизацией, например, излучением радиолокационных станций, телевизионных передатчиков, систем связи со спутниками. Тщательные исследования оказались безрезультатными. Сигналы с переменной интенсивностью не удалось отождествить ни с одним из известных земных передатчиков. Более того, вскоре в той же обсерватории были обнаружены еще три аналогичных пульсирующих источника радиоизлучения.

Спустя некоторое время ученые окончательно убедились в том, что источники странных сигналов находятся далеко от Земли. Но почему никто, кроме английских астрономов, не принимал подобных позывных?

Не так давно ученые поняли, что космос многоязычен, что он общается с нами с помощью фотонов видимого света и потоков невидимых, но всепроникающих нейтрино, а некоторые свои сообщения передает и на языке гамма-квантов, космических лучей и радиоволн в самых разных диапазонах. Сотрудники Кавендишской лаборатории как раз изучали коротковолновое космическое радиоизлучение с переменной интенсивностью. Летом 1967 года они впервые получили возможность прослушать Галактику в диапазоне относительно длинных радиоволн.

Ни на что не похожие сигналы были зарегистрированы практически сразу, как только заработал специальный радиотелескоп, какого не имела ни одна другая обсерватория в мире. Неказистый на вид прибор был сделан сотрудниками института по последнему слову техники. И ученые Кембриджа оказались единственными людьми, которым космос мог сообщить что-то совершенно новое.

Однако эти результаты не столько обрадовали астрономов, сколько встревожили; их поразила совершенно

несвойственная космическим объектам невероятно большая частота пульсаций — до нескольких десятков периодов в секунду, а по регулярности повторения можно было выверять даже самые точные электронные часы.

Английские астрономы решили сохранить полученные данные до выяснения их природы в глубокой тайне. «Первое, что нам пришло на ум, это, что мы имеем дело с искусственными источниками — сигналами «зеленых человечков», — сказал в интервью профессор Э. Хьюиш. Ученых не на шутку взволновала мысль, что, может быть, где-то рядом созрела могущественная цивилизация, намерения которой никому не известны.

Естественными источниками обнаруженного радиоизлучения могли быть лишь совсем крохотные в астрономических масштабах сверхплотные тела. И поскольку современная наука не отвергала этой возможности, профессор Э. Хьюиш вскоре предположил, что пульсирующее излучение, вероятно, принадлежит небольшим звездам — «белым горошинам», как он их называл. На вопрос журналиста: «А что лучше, профессор?» («зеленые человечки» или «горошины». — *Авт.*) — Э. Хьюиш твердо ответил: «Горошины, дорогой мой, горошины. Мне лично овощи никогда не вредили».

В феврале 1968 года, то есть спустя полгода после первой регистрации космических сигналов, в английском журнале «Природа» появилась статья, из которой мир впервые узнал об открытии необычных, пульсирующих космических объектов — пульсаров.

Среди физиков, астрономов и астрофизиков с небывалой силой разгорелись дискуссии на тему, что такое пульсары. Некоторые ученые, видимо, не без влияния со стороны научной фантастики (редкий пример прямого влияния искусства на науку), продолжали серьезно настаивать на искусственном происхождении зарегистрированных радиоимпульсов. Такое предположение освобождало теоретиков от необходимости думать и искать более простое объяснение. «Я думаю, что идея о внеземных цивилизациях в данном случае заслуживает самого серьезного внимания только в связи с наступлением периода летних отпусков» — так начал свое короткое выступление на ежемесячной научной сессии АН СССР, происходившей в мае 1968 года, академик В. Гинзбург.

Пока эксперимент не определил еще достаточно жестких рамок для теоретических рассуждений, споры были особенно горячими. «Я сам теоретик, — сказал В. Гинзбург, — и знаю, что о теории можно говорить долго, особенно если об объекте толком ничего не известно».

Но по мере накопления экспериментального материала об источниках радиоизлучения переменной интенсивности шансы одной из гипотез возросли настолько, что пульсары были наконец безоговорочно признаны быстро вращающимися маленькими, но сверхплотными нейтронными звездами. Подобно световому лучу вращающегося маяка, радиолуч от активной области на поверхности нейтронной звезды периодически становился доступным для наблюдения на Земле.

С того самого времени, как была открыта элементарная частица — нейтрон, возникла идея и о существовании нейтронных звезд, крошечных сверхплотных остатков бывших космических гигантов. Эта гипотеза затрагивала и проблему эволюции звезд, и проблему эволюции ядерной материи.

В микромире судьбу атомных ядер решают в основном ядерные и электромагнитные силы. И лишь изредка заметную роль играет слабое взаимодействие. А что управляет веществом нейтронной звезды, которая при радиусе от 10 до 20 километров имеет массу, сравнимую с массой Солнца?

Над массивными космическими телами постоянно нависает угроза гравитационного сжатия. Им удается сохранить себя в состоянии обычного вещества до тех пор, пока в их недрах непрерывно выделяется энергия, которая изнутри компенсирует силу тяжести. Но когда эта энергия иссякает и звезда не может больше бороться с силой тяжести, ее вещество превращается в густое нейтронное «тесто». И тогда звезда становится столь же чудовищно плотной, что и атомное ядро.

Наиболее тяжелое из известных ядер содержит несколько сот частиц. Если из такого «снежка» скатать огромный ядерный ком, содержащий не меньше 10^{56} нуклонов, то получится нейтронная звезда.

Загадочное космическое тело, так напугавшее своими сигналами ученых, — это всего-навсего гигантское атомное ядро, ядро, в котором гравитационная энергия, приходящаяся на один нуклон, такая же по величине, что и ядерная.

В этих условиях (условиях чудовищного давления)

протоны превращаются в нейтроны насильственным подсоединением к ним электронов. И нейтронное вещество с небольшой примесью протонов и электронов, управляемое гравитационными и ядерными силами, начинает новую жизнь в качестве пульсара.

— Наверное, если задаться целью получить капельку нейтронного вещества, достаточно убрать из ядра протоны, и оно станет сверхпрочным, потому что в нем останутся одни нейтроны, которые не будут расталкиваться, так как не имеют электрических зарядов.

— Да, отталкивание изчезнет, а вместе с ним исчезнут и условия, необходимые для существования связанной системы нуклонов. Без протонов, оказывается, нейтроны не могут образовать не только сверхпрочного ядра, но даже обычного.

Давайте попытаемся вообразить такое атомное ядро, из которого осторожно вынуты все протоны. Как прореагируют на подобную операцию оставшиеся в ядре нейтроны? Казалось бы, они немедленно заполнят все освободившиеся места в самых глубоких оболочках, и мы получим желанное нейтронное вещество с обычной ядерной плотностью.

Но принцип Паули неустанно следит за тем, чтобы нейтроны не занимали запретные для них квантовые состояния в протонных оболочках. А полупустое ядро без протонов становится менее устойчивым.

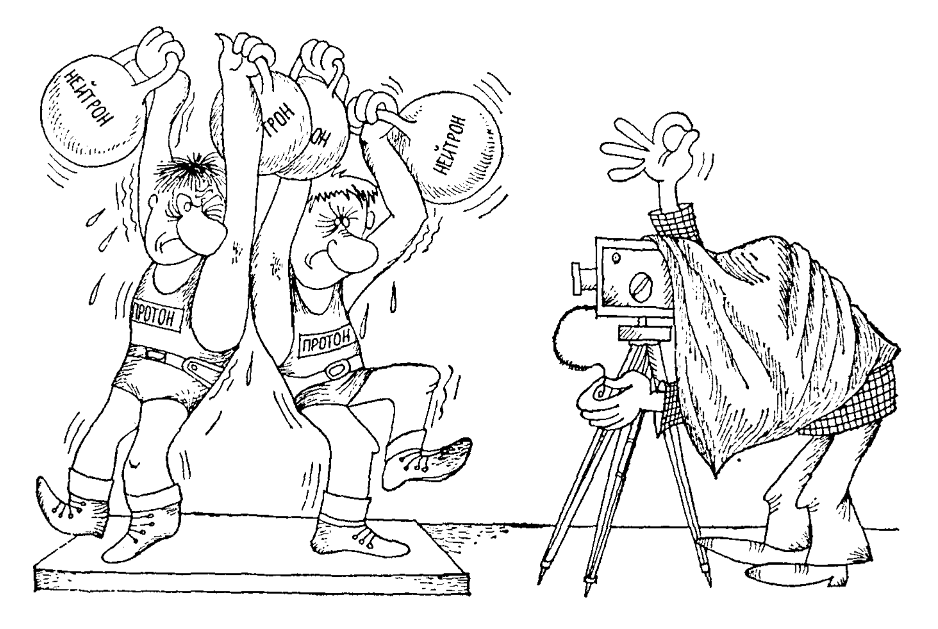
Такое нейтронное вещество совсем непохоже на пульсарное: оно рыхлое, и расстояние между частицами в нем больше среднеядерных. Это настоящий нейтронный газ, в котором ядерные силы притяжения могут не справиться даже с кинетической энергией разлетающихся нейтронов.

В необычных условиях нейтронных звезд нейтроны на протонные места загоняет сверхмощное гравитационное давление, а земной ядерной капле необходимую вязкость, по-видимому, могут придать только сами протоны.

И все-таки вопрос о существовании нейтронного вещества остается пока открытым. Теоретики не отрицают того, что его устойчивость может повышаться с увеличением числа частиц в капле. Поэтому экспериментаторы, не обнаружив связанной системы из двух нейтронов, продолжают настойчивые поиски более тяжелых нейтронных капель.

Атлет держит рекордный вес всего несколько секунд — и судейская коллегия регистрирует спортивную победу. Пусть связанная система из нескольких нейтронов развалится через мгновение. Этого достаточно, чтобы приборы зарегистрировали нейтронное ядро и новое достижение физиков-ядерщиков.

Может нейтронная капля существовать или не может? — этот вопрос теоретики решают то положительно, то отрицательно. А. Мигдал, исходя из своей теории пи-мезонного конденсата, считает, например, что нейтронное вещество может и должно существовать, поскольку конденсат способствует укреплению связи между нуклонами. Конец колебаниям положит только эксперимент.



Нейтронное вещество можно попытаться получить и добавлением в легкое ядро все большего количества нейтронов. Советские ученые Я. Зельдович и В. Гольданский в 1960 году из теоретических соображений предсказали, что можно создать совершенно необычный, насыщенный нейтронами изотоп химического элемента гелия. Ядро атома широко распространенного в природе стабильного гелия-4 содержит два нейтрона и два протона; это известная нам альфа-частица. Ученые утверждали, что около двух протонов альфа-частицы смогут удержаться не два, а целых шесть нейтронов!

Предположение было столь заманчивым, что экспе-

риментаторы, несмотря на его кажущуюся нереальность, решили попробовать получить возникший в воображении теоретиков феномен. Сначала проверили, может ли альфа-частица присоединить к себе еще один нейтрон. Оказалось, что такое ей не под силу. Из двух протонов и трех нейтронов связанной системы не получилось. Попробовали получить ядро гелия-6. Попытка была успешной. Среди продуктов самопроизвольного деления атомов калифорния-252 американские исследователи зарегистрировали около сотни таких ядер. Два протона некоторое время удерживали четыре нейтрона.

Рекордный вес был взят, но он еще не был максимально возможным. Лишь спустя несколько лет стали поступать первые сообщения о новой победе. При взаимодействии протонов высоких энергий с ядрами углерода, в реакции слияния быстрых альфа-частиц с ядром магния-26, при поглощении гамма-квантов высоких энергий ядром бора-11 иногда возникали фантастические ядра гелия-8, в котором протоны были втрое разбавлены нейтронами.

Наконец, группа физиков Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ под руководством доктора физико-математических наук В. Сидорова получила самые неопровержимые доказательства рождения ядерной, почти нейтронной капли, состоящей из двух протонов и шести нейтронов. Ядерная эмульсия навечно сохранила автограф этого чудо-изотопа, полученного в реакции поглощения медленного пи-мезона легким ядром углерода.

Продолжая свои исследования по взаимодействию пи-мезонов с атомными ядрами, та же группа физиков открыла новую ядерную реакцию; реакцию, проложившую путь к синтезу изотопов с избытком нейтронов, а может быть, и чисто нейтронных ядер.

В эмульсиях, облученных в пучке отрицательно заряженных пи-мезонов на синхроциклотроне, экспериментаторы искали такие случаи, когда в ядро влетал один мезон, а вылетали два, то есть звезды с тремя лучами. Но нет-нет да и попадали в поле зрения микроскопа странные звезды с одним выходящим лучом. Причем вылетающий мезон всегда имел положительный заряд. Каждый раз, видя такую звезду, исследователи невольно задавали себе один и тот же вопрос: «А где же второй, отрицательно заряженный пи-мезон, тот, который создал звезду и обычно тоже вылетал из ядра?»

Можно было и не обращать внимания на звезды с потерянным лучом. Мало ли что могло случиться с отрицательным пи-мезоном: он мог поглотиться ядром, превратиться в нейтрон, не оставляющий следа в эмульсии. Эти реакции были хорошо известны и имели достаточно большую вероятность. Но ученым не давала покоя одна назойливая мысль: «А что, если из ядра на самом-то деле вылетал тот же пи-мезон, что вызывал ядерную реакцию, но ухитрившийся переменить в ядре свой отрицательный заряд на положительный?»

Предположим, это, правда, не относилось к категории «сумасшедших идей», но тем не менее казалось маловероятным.

Придирчиво проверив свою идею на опыте, дубненские ученые открыли новую, очень интересную ядерную реакцию двойной перезарядки пи-мезонов.

Отрицательно заряженный пи-мезон во время пребывания в ядре успевает стать участником двух последовательных ядерных реакций. Сталкиваясь с одним протоном, пи-мезон отдает ему свой заряд и становится электрически нейтральным, а протон превращает в нейтрон. У другого протона пи-мезон отбирает положительный заряд, превращая его тоже в нейтрон. После толчка, полученного при соударении с мезоном, оба новоиспеченных нейтрона покидают ядро, не давая о себе знать. Как правило, и у самого мезона еще хватает энергии для того, чтобы перевалиться через край ядерной чаши (ведь заряженная частица может покинуть ядро, только преодолев электростатический барьер). Вот и возникает в эмульсии звезда с одним входящим и одним выходящим лучом (нейтроны — частицы нейтральные, не оставляют следов в эмульсии).

Но сколько изменений в ядре спровоцировал задержавшийся там на мгновение пи-мезон!

Ядро неожиданно потеряло два протона — две единицы электрического заряда, а значит, и две единицы в порядковом номере элемента. Теперь этому новому изотопу, обогащенному нейтронами, полагалось занять место на две клеточки ближе к началу периодической таблицы.

Не менее оригинально ведут себя по отношению к атомным ядрам и пи-мезоны с положительным электрическим зарядом. Проскакивая через ядро, такой положительно заряженный пи-мезон вступает в реакции с двумя

нейтронами. Он превращает их в протоны, а сам покидает ядро в виде отрицательно заряженной частицы. Оставшееся ядро, не потеряв ни одного нуклона, превращается в новый изотоп химического элемента, находящегося в периодической системе Менделеева на две клеточки дальше.

Это настоящий ядерный иллюзион, искусству которого, несомненно, позавидовал бы и самый знаменитый фокусник.

Скромные по внешнему виду звезды в эмульсии, на которые обратили внимание пытливые исследователи, оказались отголосками сильных изменений атомных ядер в реакции двойной перезарядки.

Открытие ученых ОИЯИ дает возможность ставить эксперименты по получению необычных ядер с запланированным числом протонов и нейтронов и помогает установить, в каком сочетании нейтроны и протоны могут создавать связанные системы.

Сейчас во многих лабораториях экспериментаторы пытаются в разных ядерных реакциях обнаружить рождение тетранейтрона — связанной системы из четырех нейтронов.

В лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был поставлен оригинальный эксперимент по поиску тетранейтрона, который мог бы возникнуть в реакции двойной перезарядки пи-мезона на ядре свинца-208.

Физики не рассчитывали на то, что гипотетические нейтронные капли будут просачиваться наружу из толстой свинцовой мишени. «Жаждущие» ядра свинца могли мгновенно поглотить эти четыре нейтрона и превратиться в более тяжелые ядра изотопа свинца-212. После быстрого радиоактивного распада эти ядра могли обернуться ядрами висмута, живущими около часа.

Нелегкая задача стояла перед физиками и химиками. Им надо было выделить из килограммовой свинцовой болванки считанное число атомов радиоактивного висмута. Экспериментаторы с большим волнением зарегистрировали несколько альфа-частиц, которые принадлежали распадающимся атомам висмута. Американские ученые повторили этот эксперимент и получили аналогичный результат. Значит, физики доказали, что тетранейтрон существует?

Нет, с этим выводом ученые не торопились. На основании столь небольшого количества обнаруженных частиц еще нельзя было сделать радикального утверждения. Алфа-частицы могли принадлежать и ядрам висмута, случайно попавшим в установку.

Может быть, тетранейтрон и вообще не может существовать? Тогда стоит искать более тяжелые нейтронные ядра. С помощью реакции двойной перезарядки ученые пытаются получить «кусочек» нейтронного вещества, состоящего из шести нейтронов.

Экспериментаторы Дубны проследили в эмульсии, облученной пи-мезонами, за необычной судьбой двух ядер азота. Из 14 нуклонов ядра азота после встречи с пи-мезонами 8 перегруппировались в ядро бора. Под микроскопом был хорошо виден характерный след этого ядра. А остальные шесть (и все шесть нейтроны!) устремились навстречу новым ядерным приключениям. Не образуют ли они хоть ненадолго шестинейтронное ядро?

Как только в распоряжении ученых будут сильноточные ускорители, — мезонные фабрики — возможно, будет решена и проблема нейтронных капель.

— Но если нейтронам так нужны протоны, то, наверное, физикам досконально известно, сколько именно их требуется ядрам разных элементов?

— Нет. Теория ядерной материи и на это пока не может ответить однозначно.

— А что говорит эксперимент?

— Экспериментаторы упорно пробиваются к границам стабильности ядерного вещества и уже ставят первые пограничные столбы.

Пока физики не вмешивались в дела природы, в ней существовали в основном стабильные ядра и небольшое число долгоживущих радиоактивных изотопов.

Если начертить на листе бумаги прямоугольные координаты и по оси X отложить число нейтронов, а по оси Y — протонов, то все стабильные ядра, из которых создан наш мир, послушно лягут почти на одну линию, которую физики называют линией стабильности: она идет сначала под углом 45 градусов к нейтронной оси, а потом все сильнее наклоняется в ее сторону.

В легких ядрах содержится одинаковое количество нейтронов и протонов. Но чем больше заряд ядра, тем труднее ядерным силам притяжения бороться с возрастающим электростатическим отталкиванием протонов.

Природа справилась с этим затруднением, отпустив на тяжелые ядра вещество, почти вдвое разбавленное

нейтронами. После столь могущественной поддержки силы притяжения добились стабильности ядерного вещества и для очень тяжелых химических элементов.

Следовательно, линия стабильности — это область наиболее устойчивых нуклонных коллективов, в которых ядерные силы притяжения обеспечили себе полную победу над силами отталкивания протонов.

Невозможно определить запас прочности той или иной конструкции, не создавая для нее заведомо неблагоприятных условий. Биологи специально завезли шим-



панзе в наши псковские леса, чтобы в необычных для них условиях наблюдать, как проявятся их возможности приспособления к новой среде. Однажды на конференции кто-то остроумно заметил, что изучать свойства ядерной материи только по стабильным ядрам — это все равно что изучать географию США по Большому Каньону.

После открытия искусственной радиоактивности ученые рьяно принялись расширять набор изотопов. Им удалось получить довольно много разных модификаций существующих химических элементов с чуть-чуть иным соотношением между протонами и нейтронами. Эти искусственно созданные ядра занимают на графике некоторую площадь вокруг линии стабильности. Назовем ее «материком стабильности».

Конечно, новые приобретения физиков жили недолго, и после радиоактивного распада вновь возвращались на привычные места вблизи линии стабильности. Но сам факт возникновения необычных связанных систем давал обильную пищу для ума. Нечего говорить, сколь интересно было выяснить, в какой степени могут быть перенасыщены протонами и нейтронами пусть даже короткоживущие атомные ядра. Одним словом, надо было найти границы существования ядерного вещества. Посмотреть, что же делается там, на краю ядерной Ойкумены?

Путеводитель для экспериментаторов, составленный теоретиками, несколько напоминает руководства для путешественников, которые существовали, например, у древних египтян. Кто из современных туристов рискнет искать страну, которая лежит там, за восточной пустыней, за лазурными водами, в безмерной дали?

Там — вещает путеводитель для ядерщиков — по обе стороны от линии стабильности, на самом краю материка, где силы притяжения в ядрах с большим избытком протонов или нейтронов уже не в состоянии справиться со своей задачей, расположены резкие обрывы, омываемые волнами моря нестабильности...

Более точно указать координаты границ материка стабильности, то есть те соотношения (разные для разных элементов) между числом протонов и нейтронов, при которых ядро распадается, едва возникнув, современная теория не может. Точное расположение обрывов придется установить самим экспериментаторам.

Теория в пределах своей компетенции обещала волнующие встречи, по крайней мере, с 6 тысячами новых радиоактивных изотопов. С 2 тысячами из них знакомство уже состоялось. Сейчас продолжаются энергичные розыски остальных.

Расширение коллекции изотопов, сильно отличающихся от уже известных, не хобби экспериментаторов. Причудливые разновидности ядер обычных химических элементов снабжают ученых недоступной раньше информацией и помогают им лучше разобраться в устройстве ядер, заполняющих линию стабильности.

Эксперименты с пи-мезонами помогли физикам найти далеко в стороне от линии стабильности удивительное ядро гелия-8 с 6 избыточными нейтронами. С помощью реакции двойной перезарядки пи-мезонов исследователи, как банки консервным ножом, вскрывают ядра с нукло-

нами и по заранее намеченной программе меняют состав ядерного вещества. Но эта деликатная операция не позволяет добраться до границ области стабильности.

Самое экзотическое нуклонное ассорти можно получить в том случае, если с большой силой ударить одним ядром по другому. Такие опыты ученые ставят на особых установках — ускорителях тяжелых ионов. В этих машинах ускоряются не отдельные протоны с единичным электрическим зарядом, а целые атомные ядра, вплоть до самых тяжелых.

В режиме ускорения тяжелых ионов работает сейчас каждый четвертый ускоритель в мире.

Самый мощный ускоритель тяжелых ионов работает в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Здесь, используя ионы, разогнанные до энергии, позволяющей им преодолеть электростатический барьер вокруг ядер мишени, экспериментаторы пытаются прорваться к границам стабильности ядерного вещества.

При слиянии содержимого двух ядерных «банок» образуется перегретое тяжелое составное ядро. Заранее сказать, каким будет сочетание протонов и нейтронов в ядре после окончания реакции, невозможно: результат зависит от того, каким способом избавится оно от избытка его энергии. Если система нуклонов придет в нормальное состояние, испаряя нейтроны, физики получат новое ядро с избыточными протонами. Но бывает и так, что сталкивающиеся ядра сцепляются и на некоторое время становятся похожими на гантель, которая поворачивается как единое целое. Вращаясь, гантель деформируется и наконец разрывается: кулоновское электростатическое отталкивание и центробежные силы побеждают ядерное притяжение. А экспериментаторы только выигрывают, потому что при разрыве этой сложной системы два-три десятка нуклонов одного ядра передается другому, и возникает необычайный мутант известного химического элемента.

Облучая мишени из тория-232 ядрами кислорода-18 и неона-22, ученые ОИЯИ создали более 10 новых тяжелых изотопов. Например, ядро углерода с 12 дополнительными нейтронами и ядра кислорода, у которых на 14, 15 и 16 нейтронов больше, чем у стабильного ядра того же элемента.

Успехи экспериментаторов, творящих ядерное вещество со столь необычайной структурой, заставляют удивляться поистине неограниченным возможностям ядерных сил. На Международной конференции в Монреале в 1969 году известный ученый профессор Х. Гоув из Соединенных Штатов Америки в своем обзорном докладе сказал, что «физика ядерной структуры останется волнующей областью исследований в течение многих лет».

За последнюю четверть века физики-элементарщики открыли огромный мир элементарных частиц. Большинство этих микроскопических объектов, рождаясь на ускорителях высоких энергий, едва успевали дать о себе знать, прочерчивая след в фотоэмульсиях, создавая туманный трек из пузырьков в водородной камере или вызывая срабатывание системы счетчиков. Но эти нестабильные кванты вещества намного расширили наши представления о строении материи. Были открыты новые законы природы, обнаружены нарушения некоторых, казавшихся незыблемыми принципов квантовой механики, мы узнали и о зарядово-сопряженном мире античастиц.

А физики-ядерщики обнаружили обширный мир изотопов-призраков по обе стороны от линии стабильности; мир, который несравненно богаче мира химических элементов. Было установлено, что ядра одного и того же элемента с избытком нейтронов и с избытком протонов так же мало похожи друг на друга, как такса на собаку породы «московская сторожевая». Коллектив ядерных нуклонов чутко реагирует на изменение пропорции между двумя типами своих членов. Меняется при этом структура ядерного вещества, избыток нейтронов приводит даже к увеличению размера ядра, которое разбухает от переполнения внешних нейтронных оболочек.

Экспериментальные результаты по получению и исследованию свойств нового ядерного мира заставляют по-иному посмотреть и на свойства ядерных сил. Здесь, на краях материка стабильности, ядерные силы, как оказалось, не слабеют, а проявляют себя еще очень активно. В области, близкой к пределу устойчивости ядерного вещества, физики обнаружили новые дважды магические ядра, новые области деформированных ядер, новые типы радиоактивного распада.

Короткоживущая связанная система нуклонов, обедненная нейтронами, проявляет себя совершенно необыч-

но для ядерного вещества. Она превращается в излучатель запаздывающих протонов. А ядерная «капля» с большим избытком нейтронов, как говорят теоретики, может повести себя еще более неслыханным доселе образом — испускать пары нейтронов.

— А чем, по путеводителю, кончается линия стабильности в области самых тяжелых ядер?

— Путеводитель предрекал такой же резкий обрыв, знаменующий окончательную и безоговорочную победу сил отталкивания над силами притяжения.

Сорок лет назад периодическая таблица Менделеева заканчивалась 92-м химическим элементом — ураном. Более тяжелых элементов в природе не находили. На ядре урана круто обрывалась и линия стабильности.

Прорыв урановой границы совершил итальянский ученый Э. Ферми. Облучая ядра урана замедленными до тепловых скоростей нейтронами (то есть до скорости, соответствующей тепловому движению молекул при комнатной температуре), Э. Ферми получил первый трансурановый, девяносто третий, элемент — нептуний.

Один за другим семь новых типов ядер были вырваны физиками из небытия, семь новых химических элементов могли изучать химики. Как непрерывно растет площадь Голландии за счет земли, отвоеванной у моря, так удлиняется и таблица элементов за счет искусственно создаваемых новых ядер.

Работа по синтезу трансурановых элементов, вплоть до сотого, названного в честь Э. Ферми фермием, не была особенно затруднительной для физиков. Методика в принципе не отличалась от той, что использовал сам Э. Ферми. Экспериментаторы помещали тяжелые ядра в мощный поток нейтронов, например в ядерный реактор, и выжидали, пока время и бета-распад (распад одного ядерного нейтрона на протон, электрон и нейтрино) не сделают свое дело. И все шло отлично. Тяжелые ядра послушно глотали нейтроны, а после бета-распада исправно превращались в ядра элементов с атомным номером, на единицу большим.

Однако после сотого элемента фермия этот номер неизменно проваливался. Ядро фермия-258 уже не годилось для получения ядра бета-радиоактивного изотопа фермия-259. Оно самопроизвольно делилось раньше, чем должно было бы выполнить возлагаемые на него обязанности.

Спокойная жизнь кончилась. Физики поняли, что бета-распад им больше не помощник. Для продвижения в трансфермиевую область следовало поискать нового гида. Им стала реакция захвата тяжелым ядром ускоренных альфа-частиц или ядер изотопа водорода — дейтерия.

Альфа-частица приносила в ядро сразу два новых протона, поэтому мишень было можно сделать не из фермия, а из более долгоживущего 99-го элемента, эйнштейния-253. Но где было взять эти тяжелые ядра для



мишени? Ни один химик в мире не мог бы выполнить заказ по изготовлению такой мишени. Ядра эйнштейния сначала предстояло «вырастить» в атомном реакторе.

К 1955 году накопилось около $5 \cdot 10^{-7}$ микрограмма 99-го элемента, которые и были использованы для синтеза 101-го элемента. И вот в реакции: ядро эйнштейния альфа-частица были получены первые 17 атомов нового, 101-го, элемента, названного менделевием в честь выдающегося русского химика Д. Менделеева.

Но, располагая столь эфемерной мишенью из эйнштейния, экспериментаторы могли получить лишь один атом менделевия в час. Это сколько же пришлось бы ждать, пока накопится достаточное количество ядер для мишени из 101-го элемента?

Ученым стало ясно, что и с помощью легких заряженных частиц далеко не продвинуться.

Надежного проводника в трансфермиевую область они получили только после создания ускорителей тяжелых ионов. И кошмарная проблема выращивания ядер для мишени перестала существовать. В далекую трансфермиевую область можно было проникнуть, облучая мишени из более легких веществ сложными ядрами.

Но выбранный физиками никем еще не пройденный путь на неизвестное расстояние, ведущий по тропе, захлестываемой волнами моря нестабильности, оказался нелегким. Мишени содержали достаточно большое количество вещества, и ускоритель давал интенсивные потоки ионов, а ядра новых трансфермиевых элементов опять возникали, как говорится, в час по чайной ложке. Несколько десятков атомов 102-го элемента в час и только один атом 105-го элемента за десятки часов можно было получить на ускорителе тяжелых ионов, работающем во всю мощь.

Затраченные усилия практически пропадали даром. Реакция деления, как бы насмехаясь над надеждами физиков, подряд «рубила» пополам полученные с такими затратами энергии составные тяжелые ядра. Только незначительной их доле удавалось избежать превращения в легкие ядра и остыть путем испарения нейтронов.

Но маршрут не считается пройденным, если отсутствуют отметки в контрольных пунктах. У физиков, пробирающихся по трансфермиевой области, контрольный пункт — это открытие очередного, более тяжелого ядра. Отметка же о действительно пройденном этапе — это четкое опознание нового элемента, необходимое для присвоения ему порядкового номера в периодической системе.

Необходимо было выполнить сложнейшую работу по определению заряда ядра, массы, времени жизни, вида радиоактивного распада при получении атомов, распадающихся быстрее, чем их удается собрать вместе.

Ничего не получилось бы у физиков, если б не помог закон сохранения энергии и импульса. Тяжелое ядро, захватывая ускоренный ион, одновременно приобретает его импульс и, как барон Мюнхгаузен на пушечном ядре, вылетает из мишени. Остается лишь уловить эти ядра-продукты и транспортировать из зоны облучения в зону анализа химических и физических свойств.

В некоторых экспериментах это делал гелиевый «ветер». Мишень помещалась в камеру, заполненную гелием при давлении в одну атмосферу. Отверстие в полмиллиметра соединяло эту камеру с другой, воздух из которой предварительно откачивался. Газ из первой камеры устремлялся к отверстию, увлекая за собой и выбитые из мишени тяжелые ядра. На расстоянии сантиметра от отверстия струя гелия ударялась в предусмотрительно поставленный там специальный сборник, на котором и оседали новые ядра. Сборник, например алюминиевый обод колеса, перемещался, поднося полученные ядра прямо к счетчикам, регистрирующим радиоактивное излучение от этих нестабильных ядер.

Малое время жизни трансфермиевых элементов не давало возможности провести столь необходимое химическое опознание получаемых атомов традиционными методами. Своеобразным рекордом считалось химическое опознание 101-го элемента, менделевия, по распаду 17 его атомов, при периоде полураспада в полтора часа.

Казалось, что же могли поделать радиохимики, когда пришла пора определить химические свойства 104-го элемента, курчатовия, число атомов которого уменьшается наполовину за доли секунды?

И все-таки группа радиохимиков Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ под руководством чехословацкого ученого И. Звары решила эту проблему. Они создали химический конвейер непрерывного действия, который по реакции в газовой среде позволил в первых же измерениях обнаружить и изучить химическое поведение всего 12 атомов курчатовия.

Открытие следующего, 105-го, элемента на ускорителе тяжелых ионов в Дубне в начале 1970 года потребовало больших усилий от физиков. Этот элемент был получен при облучении мишени из америция ускоренными ядрами неона. 95 протонов ядра америция, слившиеся с 10 протонами неона, образовали ядро нового элемента со 105 протонами.

Требования к чистоте мишени в этом эксперименте были настолько высокими, что поначалу вызывали у химиков лаборатории даже щемящее чувство тоски. В америции не должно было быть примеси свинца, который при облучении мишени мог дать нежелательный фон.

«Трагедия» состояла в том, что вся лаборатория, как и любая другая, где ведутся работы на ускорителе, была буквально начинена свинцом. Предстояла сложная операция. Не теряя времени даром, составили карту распространения свинца по всем комнатам лаборатории. Каждая из них, не исключая и кабинета директора, была обработана пылесосами, и собранная пыль специально исследовалась на присутствие свинца. Из помещений, где работали с мишенью, были вынесены все книги, журналы, проспекты, в общем, вся печатная продукция. Даже свежей газеты нельзя было просмотреть во время обеденного перерыва. Тотальная война со свинцом привела к тому, что химики изготовили мишень, которая достигала полупроводниковой чистоты. Содержание свинца на один грамм америция не превышало десятитысячных долей микрограмма.

Немало забот было и у тех, кто должен был создать механизм, за очень короткое время переносящий сборники с атомами 105-го элемента к счетчикам. Предлагалось даже использовать устройство, напоминающее пулемет: сборники ядер делать в виде пуль, на них собирать ядра, выносимые газом из камеры с мишенью, а затем выстреливать их к детекторам. Но экспериментаторы остановились на более «мирном» — пневматическом устройстве.

Итак, в Дубне к 1970 году были созданы новые элементы, которые заполнили от 102-й до 105-й клеточки периодической таблицы. Аналогичные эксперименты проводились в Радиационной лаборатории имени Лоуренса в США.

А в 1974—1975 годах в Лаборатории ядерных реакций при облучении свинцовой мишени ионами хрома был получен изотоп 106-го элемента и в реакции ионов марганца с ядрами висмута — пока самый тяжелый элемент таблицы Менделеева с атомным номером 107. Оба эти изотопа живут только несколько миллисекунд.

— Это что, уже предел? Далее круто обрывающийся берег материка стабильности?

— И да, и нет. Спуск с плато оказался не совсем таким, каким его представляли себе теоретики, и им пришлось срочно выпустить новый путеводитель, последняя часть которого представляла собой... лоцию.

— Неужели предлагается путешествие по морю нестабильности?

— Теоретики полагают, что смелые мореплаватели вправе рассчитывать на открытие островов стабильности. Как знать, может быть, и физиков ждет свой остров Пасхи.

Среди трансурановых элементов попадались такие, время жизни которых растягивалось на десятки тысяч лет. Но в области сверхтяжелых ядер в полном соответствии с предсказаниями модели жидкой капли свирепствовала эпидемия неустойчивости. Казалось, что управлять столь огромными коллективами нуклонов, действительно, уже свыше ядерных сил.

По теории, химические элементы, следующие за 105-м, должны были иметь столь малое время жизни по отношению к самопроизвольному делению, что получить



их на современном уровне экспериментальной техники было невозможно. Делительная катастрофа, как окрестили физики эту роковую преграду, вот-вот должна была положить предел исканиям ученых. Но, как говорил П. Капица, хорош тот эксперимент, который не согласуется с теорией. Опыты, поставленные на ускорителях тяжелых ионов по синтезу 105-го, 106-го и 107-го элементов, показали, что делительная катастрофа не наступила.

Изотоп 105-го элемента, обнаруженный в лаборато-

рии ядерных реакций, имел время жизни две секунды, а американские ученые сообщили о получении изотопа 105-го элемента с 262 нуклонами, который существовал в 20 раз дольше. Ученые Дубны пытаются получить более долгоживущие ядра и 106-го элемента.

Недалеко от круто обрывающегося материка стабильности физики неожиданно нащупали в море отмель. Что же тормозило наступление делительной катастрофы? Причиной этого могла быть только достаточно четкая оболочечная структура тяжелых ядер; та самая структура, которая раньше считалась привилегией легких и средних по массе ядер. Иначе просто невозможно было объяснить тот факт, что ядра фермия-256 делятся через 2,7 часа, а изотопа фермия-257, имеющего на один нуклон больше, — лишь через сто лет.

Упаковка нейтронных оболочек так влияет на устойчивость ядра, что присоединение даже одного дополнительного нейтрона к 250 нуклонам не остается незамеченным. И обнаруженный экспериментаторами прибрежный «шельф» можно рассматривать как проявление оболочечных эффектов в ядрах сверхтяжелых элементов.

Это приятное обстоятельство вселило новые надежды. Теоретики смелее посмотрели в сторону предполагаемой границы периодической системы и, сверившись с формулами, взятыми из модели оболочек, проложили курс к островам стабильности.

Один из островов соответствует тяжелейшему атомному ядру с новым магическим числом протонов — 114 и новым магическим числом нейтронов — 184. А второй — еще более тяжелому ядру с магическим числом протонов — 126 и 184 нейтронами.

Два далеких таинственных острова сверхтяжелых элементов опять лишили физиков покоя. Они заметались на трансфермиевом берегу, придумывая всевозможные способы преодоления расстояния, отделяющего их от вожделенных островов.

Директор Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ академик Г. Флеров сказал, что «открытие островов стабильности будет так же важно для ядерной физики, как для своего времени открытие Колумбом Америки».

Как же можно было достигнуть цели — доказать, что сверхтяжелые ядра существуют?

На ускорителях тяжелых ионов пока не удается сра-

зу синтезировать ядра со 114 или 126 протонами, и ученые решили проверить: а нет ли перешейка между материком и ближайшим островом стабильности?

От урана до ближайшей цели лежит 22 химических элемента, 22 шага тяжелейшего маршрута. 15 шагов уже позади, и каждый из них приходилось делать, прощупывая под ногами дно. В любой момент прибрежный шельф мог смениться бездонной глубиной моря нестабильности. Но смельчаки продолжают свой путь и уже готовят опыты по синтезу еще более тяжелых ядер.

Другая группа исследователей воодушевилась выводами теории о том, что время жизни элементов, примыкающих к островам стабильности, может лежать в очень широком интервале значений: от сотни миллионов лет до микросекунд. Вернее, теоретики не могли сказать ничего определенного на этот счет.

Как только возникло предположение о сверхживучести гипотетических островитян, экспериментаторы тотчас сели на корабли и поплыли в Тихий океан... за ядрами сверхтяжелых элементов. Космические лучи от источников, находящихся где-то в центре Галактики, достигают нашей провинциальной солнечной системы примерно за 10^5—10^6 лет. Если в их состав входят и долгоживущие ядра сверхтяжелых элементов, то можно попытаться найти эти ядра на поверхности Земли. Общее число атомов тяжелых элементов, падающих на Землю, мало́, поэтому имеет смысл исследовать лишь те объекты, в которых они могли накапливаться в течение долгого времени.

В морях и океанах, занимающих большую часть земной поверхности, тяжелые элементы, такие, как марганец и железо, постепенно осаждаются на разбросанных по дну остатках органического происхождения, например на зубах акул. Слой толщиной в один миллиметр нарастает приблизительно за 100 тысяч лет. И в таких железомарганцевых конкрециях, плотных шариках темного цвета диаметром около пяти сантиметров, могут собираться и попадающие в океан из космоса атомы элементов с острова стабильности. Сверхтяжелые элементы могут находиться также в природных минералах и рудах, если ядра этих сверхтяжелых атомов, существующих лишь в воображении теоретиков, действительно имеют время жизни, близкое к возрасту Земли.

Ученые предполагают, что по своим химическим свойствам 114-й элемент должен быть аналогом свинца. Поэтому в Лаборатории ядерных реакций тщательно исследуют образцы свинцовых руд, присылаемые из разных мест планеты.

В лабораторных комнатах появились шкафы, заполненные старинными зеркалами и кубками из стекла — предметами, которые можно встретить в антикварных магазинах, но никак не среди физических приборов. Причина этого небывалого интереса сотрудников лаборатории к предметам старины объясняется очень просто: вместе со свинцом в состав старинного зеркала мог попасть и похожий на него сверхтяжелый элемент с острова стабильности. За то время, что прошло с момента изготовления стекла средневековым мастером, сверхтяжелые ядра, распадаясь, могли создать в нем участки с нарушенной структурой. Химическая обработка превращала эти следы распада в треки, которые можно было увидеть с помощью обычного микроскопа.

Сверхтяжелые элементы искали и в верхних слоях атмосферы, в составе космических лучей. Большие стопки ядерных эмульсий на несколько десятков часов забрасывались навстречу сверхтяжелым галактическим пришельцам. Их следы выискивались в поверхностных кристаллах метеоритов, сотни миллионов лет бороздящих просторы космоса.

Поиски необычных экспонатов для ядерной физики привлекали к себе внимание физиков, химиков, геохимиков и космохимиков в научных центрах разных стран. Но в целом результаты экспериментов по поиску сверхтяжелых элементов в природе пока отрицательны.

Фантастические, огромные по масштабам исследования конкреций, метеоритов, руд, десятков тысяч кубометров подземных вод показали, что если предсказанные элементы и существуют в природе, то их концентрация в наиболее удачных образцах меньше 10^{-12} грамма на грамм изучаемого материала.

Американские исследователи, которые искали в природе 110-й и 111-й элементы — химические аналоги соответственно платины и золота, — тоже пока ничего не обнаружили.

Физики Лаборатории ядерных реакций в Дубне, как и американские ученые, продолжают поиски следов сверхтяжелых элементов в природе. Может быть, эти

поиски ничего не дадут, может быть, разыскиваемые ядра короткоживущие и наблюдать их можно только на ускорителях, в реакциях с тяжелыми ионами.

Но если и эксперименты на ускорителях не приведут к ожидаемому результату, если острова стабильности разделят участь Земли Санникова, то теоретикам придется еще раз пересмотреть сложившееся представление о поведении сверхтяжелой ядерной материи.

Занимаясь фундаментальной проблемой синтеза сверхтяжелых элементов, пробиваясь к границам нуклонной стабильности ядер, физики попутно решают и некоторые практические задачи.

Тяжелые ускоренные ядра оказались пригодными не только для осуществления специфических ядерных реакций, но и для разработки целого ряда далеких от ядерной физики проблем. Тут и вопросы радиационной устойчивости материалов, и медико-биологические задачи.

Наиболее простым по своей идее и в то же время весьма перспективным и впечатляющим по своим результатам является применение пучков тяжелых ионов в качестве «микроигл» для производства ультрамелких по размерам и уникальных по эксплуатационным качествам фильтров.

В тонкой пленке слюды, стекла или пластмассы тяжелое ускоренное ядро пробивает канал сильного радиационного поражения. Если пораженные участки подвергнуть операции химического травления, то в пленках получаются сквозные отверстия.

На ускорителе тяжелых ионов можно получить высококачественные молекулярно-вирусные ядерные фильтры с размером пор от $4 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-3} миллиметра. Через такие отверстия не пролезть даже бактериям, размер которых более 0,2 микромикрона.

Ядерные фильтры, или, как их называют, «нуклеопоры», можно будет использовать для холодной стерилизации пищевых продуктов. Широкое применение они найдут в биологии и медицине, например, для разделения клеток различных типов.

— Хотелось бы понять: тысячи новых, искусственно полученных изотопов, новые трансурановые элементы — это что? Укор природе, которая не использовала всех своих возможностей, или они существовали когда-то, а их отсутствие в природе как-то связано с историей Земли?

— Справедливо второе предположение. Современные химические элементы и изотопы — результат естественного отбора по устойчивости среди обширного семейства рождающихся атомных ядер.

— Разве ядра рождаются и умирают?

— Да.

Наша планета образовалась около четырех с половиной миллиардов лет назад. И ядра трансурановых элементов и короткоживущих изотопов просто не дотянули до нашего времени. Почти «вымер» изотоп урана-235.

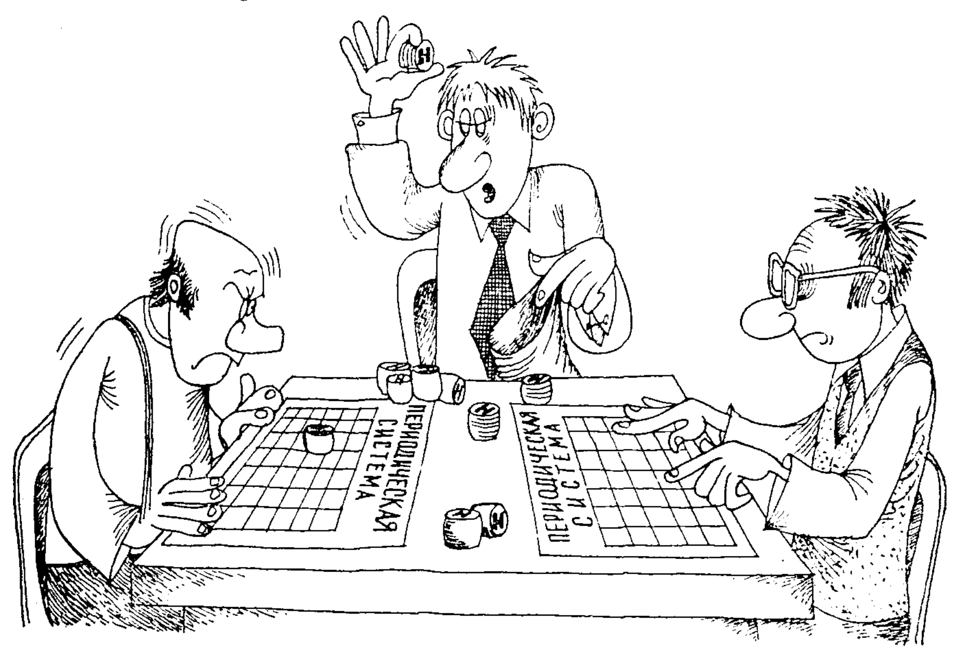
Проблема относительной распространенности химических элементов на Земле и во вселенной волновала ученых еще до рождения ядерной физики. Процентное содержание того или иного элемента в природе на первый взгляд мало что говорит нашему уму и сердцу. Но эти сухие цифры сразу убеждают в том, что вселенная состоит из единого материала, разложенного по ячейкам таблицы Менделеева. Несомненно, что из одних нейтронов природа не могла бы создать ничего, в том числе и нашу Землю. Только ядра, содержащие протоны, притягивали к себе электроны и превращались в атомы разных химических элементов. Если бы какой-нибудь злоумышленник вроде инженера Гарина или Фантомаса создал прибор, с помощью которого он мог бы уничтожить электромагнитное взаимодействие, все вещество распалось бы на электроны и атомные ядра.

Из каких же веществ состоит вселенная? Ответ очень прост: на 76 процентов из водорода и на 23 процента из гелия, а один оставшийся процент приходится на долю всех более тяжелых элементов, заполняющих линию стабильности. И что удивительно, относительная распространенность этих тяжелых элементов качественно совпадает для таких разных и удаленных друг от друга на огромные расстояния космических объектов, как Земля и межзвездное пространство, атмосфера планет и далеких звезд, метеориты и Солнце.

Везде преобладают легкие элементы. Среди средних по массе элементов повышенной распространенностью выделяется железо, ядра которого упакованы наиболее плотно. Чаще других встречаются и кислород, калий, свинец с магическим числом нуклонов в ядрах.

И содержание элементов в природе, и происхождение их связано с законами, управляющими ядерным веществом. С идеей об эволюции элементов вступал в науку еще Э. Резерфорд. Но только физика атомного ядра, у истока которой он стоял, создала мощный фундамент для решения проблемы эволюции и происхождения химических элементов.

По рассыпанному вдоль линии стабильности набору атомных ядер так же сложно было представить точные контуры древнейшей системы изотопов химических элементов, как трудно было по отдельным камням воссоздать первоначальный облик уникального собора в Юрьев-Польском, развалившегося в XV веке.



Известному советскому искусствоведу Г. Вагнеру в работе над реконструкцией этого древнего памятника архитектуры помогло глубокое изучение тематических особенностей художественной резьбы, покрывающей буквально каждый камень собора. А физикам в решении вопроса о происхождении элементов помогают эксперименты на ускорителях тяжелых ионов. Искусственно вызываемые ядерные реакции как бы возвращают нам те давно исчезнувшие химические элементы и изотопы с необычным соотношением протонов и нейтронов, которых, по-видимому, было много среди первозданного набора ядер.

Усилиями ученых многих специальностей удается, как на кинопленке, немного прокрутить в обратную сторону естественный ход развития мира.

Физики связывают эволюцию элементов с определенными реакциями, в которых из более простых ядер рождаются сложные. Эволюция элементов — результат определенной последовательности ядерных реакций, протекающих в любом уголке вселенной, где есть подходящие условия.

Но для рождения атомных ядер требуется какой-то исходный материал и достаточное количество энергии. По горячей модели развития вселенной температура вещества и плотность на ранней стадии были столь велики, что легко обеспечивали непрерывный хоровод рождающихся и исчезающих элементарных частиц. Когда же плотность и температура вещества значительно уменьшились, от всего пестрого разноцветья частиц остались только стабильные протоны.

В этот момент мир состоял практически из одного химического элемента — водорода. Из этого же элемента вселенная состоит в основном и сейчас, приблизительно 20 миллиардов лет спустя.

Какие же сверхнеобычные условия понадобились для переработки в течение двух десятков миллиардов лет всего одного процента свободных протонов в связанные ядерными силами нейтроны?

Заполнить всю периодическую систему элементов, имея под руками один водород, не так-то просто. По-видимому, начать пришлось с реакции слияния ядер водорода, ибо ничего другого придумать просто невозможно.

Но реакция соединения четырех ядер водорода в ядро гелия — это давно известная ученым термоядерная реакция, которая снабжает энергией наше Солнце. Термоядерный синтез идет в недрах солнечного вещества, где температура достигает десяти миллионов градусов. И даже в этих феноменальных условиях образование новых ядер происходит чрезвычайно медленно. Одно ядро гелия-4 образуется из четырех протонов только через 330 миллионов лет, а в другом термоядерном цикле — даже через 14 миллиардов лет. Эта сверхчерепашья скорость ядерных реакций на Солнце связана с тем, что даже при максимальной солнечной температуре еще очень мала вероятность преодоления сближающимися протонами сильного электростатического отталкивания.

Остывшая после расширения вселенная не могла обеспечить даже минимальных условий, необходимых для начала ядерных реакций. Их создали гравитационные силы.

Примерно 18 миллиардов лет назад в тех участках пространства, где масса вещества случайно превысила некоторую критическую величину, начали формироваться первые звезды. Сжимая вещество, гравитация могла разогреть водородный газ до необходимой температуры в несколько миллионов градусов. Силы тяготения разожгли термоядерный костер прямо в центре гигантского «резервуара» с водородным топливом. И звезда превратилась в пылающую печь, в которой водород, сгорая, преобразовывался в гелий.

Водород и гелий — два самых легких вещества, первые ступеньки в системе элементов. И только из этих двух ядер предстояло создать еще девять десятков более сложных конфигураций из нуклонов.

Говорят, лиха беда начало. Как только было положено начало синтезу элементов, так гравитационные и ядерные силы, по-видимому в полном согласии друг с другом, повели это сложное дело дальше. Достаточно было чуть-чуть выгореть в сердцевине звезды водороду и упасть давлению, как новое гравитационное сжатие поднимало температуру печи еще выше, до 100 миллионов градусов. А при такой температуре роль топлива играл уже сам новоиспеченный гелий. Ядра гелия приобретали энергию, достаточную для преодоления более высокого, чем у протона, электростатического барьера альфа-частицы. В звездной печи, которая топилась альфа-частицами, выпекался уже достаточно широкий ассортимент изделий — атомных ядер. Сливаясь между собой, альфа-частицы создавали ядра углерода. Углерод, захватывая ядро гелия, превращался в кислород. А кислород, проделывая то же самое, оборачивался неоном. И наконец, при температуре, доведенной гравитационным сжатием до миллиарда градусов, в топку шел уже углерод.

Но ядерная реакция «сгорания» — соединение ядер углерода, совсем непохожа на сгорание угля в топках электростанций. На углеродном топливе при ядерных реакциях выпекались уже такие «пироги и пышки», как ядра магния, кремния и всех других элементов, вплоть до железа.

Дальнейшее присоединение альфа-частиц или протонов только портило «железное» ядерное тесто, и оно разваливалось прямо в момент выпечки. Таблица химических элементов могла бы так и остаться заполненной лишь наполовину, если бы, к счастью, в недрах раскаленной звезды не накопилось достаточное количество нейтронов. Сложные ядра оказались как бы погруженными в ванну из этих частиц.

Захватывая нейтроны, атомные ядра, как по винтовой лестнице, начали медленно карабкаться вверх по дуге стабильных изотопов.

Дополнительный нейтрон сталкивает ядро в сторону избытка нейтронов от линии стабильности. А после бета-радиоактивного распада, при котором в связанном коллективе нуклонов возникает добавочный протон, ядро возвращается на линию стабильности с более высоким порядковым номером.

Конечно, так должно было бы происходить в идеальном случае. Множество же ядер, поглотив слишком много нейтронов или, наоборот, проявив к ним антипатию, наверняка заполняли весь материк стабильности до самых границ.

Самые тяжелые ядра, как предполагают ученые, возникают, например, при вспышке сверхновой звезды. В сверхновую превращается очень старая звезда, когда после выгорания топлива внутри ее падает давление. Резкое гравитационное сжатие приводит к взрыву оболочки. Извержение даже самого мощного земного вулкана — не более чем вспышка спички рядом с этим космическим катаклизмом. Взрыв захватывает даже самые глубокие области звезды. И долгие миллиарды лет копившиеся там сложные ядра — драгоценный продукт эволюции звезды, проносясь сквозь бушующие вокруг нейтронные смерчи, попадают вдруг в безмятежный покой межзвездного пространства.

В последние годы ученые пытаются установить, насколько процесс рождения самых тяжелых ядер зависит от вспышек сверхновых. Считается, что нейтроны во время вспышки сверхновой, подобно песку во время самума, забивающему любую трещину, быстро в большом количестве забивают сложные ядра, переводя их в разряд самых тяжелых.

А может быть, в течение длительного пребывания в звездной нейтронной ванне тяжелые элементы, как кристаллы в пересыщенном растворе, «растут» постепенно?

Оба эти варианта возникновения тяжелых элементов несколько различаются по конечному результату. Если справедлив первый, то большую вероятность образования имеют ядра платины. По второму варианту предпочтение отдается элементам вблизи свинца.

Эти особенности должны были обязательно проявиться в распространенности тяжелых элементов в составе космического излучения. Но результаты просмотра и анализа следов ядер в эмульсиях, которые экспонировались и в стратосфере, и на орбитальной станции «Скайлэб», пока не дают возможности сделать однозначный вывод. В распределении следов тяжелых ядер, зарегистрированных в стратосфере, налицо максимум в области платины, а серия измерений в космическом пространстве выявила преобладание ядер в области свинца.

Сейчас в разных странах готовится большая серия экспериментов для окончательного решения вопроса о содержании ядер тяжелых элементов в космических лучах, а следовательно, и о двух моделях нуклеосинтеза.

Некоторые теоретики допускают, что нейтронная звезда — остаток сверхновой — это космическая фабрика, специализирующаяся на производстве тяжелых элементов. По идее американского теоретика Ф. Дайсона, «вулканическая» деятельность на быстро вращающемся пульсаре в сочетании с сильным магнитным полем проводит к выбрасыванию в межзвездное пространство быстрых ядер тяжелых элементов.

Таким же путем космические лучи могут обогащаться и каплями нейтронного вещества, которые после бета-распада части нейтронов приобретают протоны и превращаются в ядра сверхтяжелых элементов.

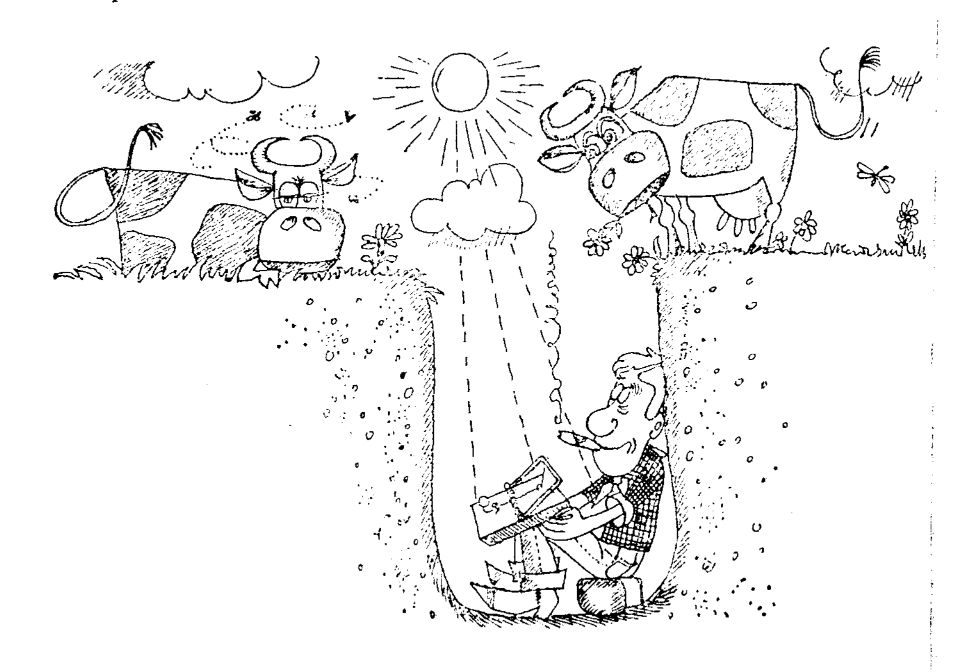
По-видимому, вся солнечная планетная система и образовалась несколько миллиардов лет назад из такого «вторсырья». То есть вещества, уже прошедшего через горнило ядерного звездного синтеза. Иначе невозможно объяснить присутствие тяжелых элементов в такой относительно молодой звезде, как наше Солнце.

— Если процессы, в результате которых возникли все химические элементы, закончились многие миллиарды лет назад, то может ли наука доказать, как это происходило и когда возникло именно вещество Земли?

— Ученые все более точно устанавливают этот момент в космологической шкале времени, опираясь на результаты экспериментов с ускоренными частицами, на исследования естественной радиоактивности и космических лучей.

Ближайшая к нам звезда — Солнце — находится на относительно ранней стадии развития. И все, что мы о ней знаем, подтверждает предположение об исправно работающей в ее недрах термоядерной печи. «Иначе и быть не может», — говорят ученые уже на протяжении почти полувека.

Но и на сегодняшний день нет прямых доказательств протекания внутри Солнца этой первой реакции в цепи ядерного синтеза, то есть синтеза ядер гелия из ядер водорода. Английский астрофизик А. Эддингтон говорил: «Нет ничего проще звезды». Современные ученые думают несколько иначе.



Физика элементарных частиц подсказала, как можно добыть вернейшее доказательство истинной работы нашего светила. Для этого надо зарегистрировать нейтрино, которые рождаются на Солнце в некоторых реакциях термоядерного цикла.

Американский ученый Р. Дэвис из Брукхэйвенской лаборатории США попытался добыть эти доказательства в очень сложном и дорогостоящем эксперименте с помощью аппаратуры, спрятанной глубоко под землей. Опыт не удался. Солнечные нейтрино словно сквозь землю провалились. После первых неудачных измерений рабочие, собиравшие установку, желая ободрить ученого, говорили: «Не огорчайтесь, доктор Дэвис, ведь лето было такое облачное». Они не знали, что практически не существует такой преграды, которая могла бы помешать потоку солнечных нейтрино достигнуть установки Дэвиса.

Отрицательный результат поисков солнечных нейтрино не поколебал уверенности астрофизиков в медленном, но неуклонном превращении запаса солнечного водорода в ядра гелия-4. Отсутствие нейтрино вполне можно было объяснить, не отказываясь от идеи термоядерных реакций, другими, менее радикальными способами, иногда весьма оригинальными.

Желание подкрепить прямыми экспериментальными результатами гипотезу об эволюции звезд и о ядерном нуклеосинтезе, то есть образовании ядер, не оставляло ученых разных специальностей.

Вещество внутренних слоев звезды за семью печатями упрятано от земных наблюдателей. Доступна только звездная атмосфера. В то же время известно, что синтез ядер идет в самой глубине, там решается судьба звезды. И химический состав ее раскаленной сердцевины может подтвердить или опровергнуть предположения ученых.

Но если пока не удается заглянуть внутрь даже нашего ближайшего соседа — Солнца, то что уж, казалось бы, мечтать об исследовании удаленных звезд. Тем не менее астрофизики обратили внимание на звезды, эволюция которых заканчивалась мощной световой вспышкой, — на сверхновые. Взрыв сверхновой выбрасывал наружу вещество, «перетомившееся» в раскаленной звездной печке.

Так появилась уникальная возможность исследования химического состава глубинного вещества звезды. Важно было сравнить содержание водорода, гелия, углерода и кислорода — основных участников двух термоядерных циклов — в оболочках сверхновых и во всех других космических объектах.

В атмосфере звезд, Солнца и газовых туманностей больше всего водорода; гелия в 5 раз меньше, а угле-

рода, азота и кислорода, соответственно, в 3 тысячи, 8 тысяч и в полторы тысячи раз меньше водорода. В оболочках сверхновых соотношение между этими элементами должно быть другим. А как же иначе? Вещество, миллиарды лет находившееся в недрах звезды, не могло не подвергнуться изменениям. Причем его участие в термоядерных реакциях углеродно-азотного цикла должно было наложить на него вполне определенный отпечаток. Неопровержимой уликой мог стать «недовес» углерода и кислорода, которые интенсивно превращались в ядра азота.

Очень сложный анализ оптических спектров оболочек сверхновых принес чрезвычайно интересную информацию. Относительное содержание химических элементов в выброшенном из недр звезды веществе резко отличалось от обычной распространенности элементов в остальных космических телах. В нем было много атомов гелия, азота и металлов и недоставало водорода, углерода и кислорода.

Это был очень важный результат и для гипотезы об эволюции звезд, и для проблемы происхождения элементов.

Синтез элементов, по-видимому, непрерывно происходит во вселенной. Радиоактивный элемент технеций, который обнаружен в оптических спектрах некоторых звезд, имеет период полураспада всего 220 тысяч лет. Но звезды значительно старше, значит, ядра технеция образуются в процессе нуклеосинтеза, идущего в их недрах.

В настоящее время на Земле новые элементы в заметном количестве не возникают. И тот факт, что долгоживущих тяжелых радиоактивных элементов тем меньше, чем короче период полураспада, наводит на мысль об их образовании в отдаленные времена.

Нестабильные атомные ядра тяжелых элементов, присутствующие ныне на Земле, — эти радиоактивные часы вселенной — аккуратно отмеряют время, отделяющее нас от момента формирования солнечной планетной системы и завершения процесса создания ее вещества.

Ядерная космохронология, опираясь на естественное предположение о том, что все тяжелые элементы в процессе нуклеосинтеза образовались примерно в одинаковом количестве, позволяет сделать очень интересные выводы. Зная время жизни сохранившихся тяжелых ядер и их современную распространенность на Земле, можно совершить увлекательную космологическую прогулку в далекое прошлое к моменту рождения этих нуклонных систем.

Прослеживая в обратном направлении судьбу любого из долгоживущих изотопов урана-238, тория-232 и почти исчезнувшего урана-235, мы уткнемся в одну и ту же точку на шкале времени. Точку, которой соответствует одинаковое максимальное количество самых тяжелых изотопов.

Между нашим временем и этой точкой лежит интервал примерно в 5 миллиардов лет. Но около 5 миллиардов лет и нашей Земле. Видимо, синтез элементов в нашей Галактике закончился (в его наиболее интенсивной фазе) непосредственно перед созданием солнечной системы.

До последнего времени ученые в своих расчетах опирались только на три типа «подопытных» ядер. Но чем разнообразнее материал для исследования, тем достовернее результаты.

Несколько лет назад закончилась одна из волнующих «детективных» научных историй, в результате которой космохронология приобрела еще один экземпляр такого редко встречающегося изотопа-хронометра. В одном из метеоритов было обнаружено совершенно необычное количественное соотношение между четырьмя изотопами благородного газа ксенона. Ученые подозревали, что ядра ксенона появились в метеорите в результате спонтанного деления изотопа плутония-224, который из-за своего «короткого» времени жизни, около 80 миллионов лет, считался давно вымершим на Земле.

Но метеориты образовались в одно время с нашей планетной системой, и если бы удалось найти следы плутония-224 или четко доказать, что уникальное соотношение между изотопами ксенона связано именно с его делением, то можно было бы независимо и более точно установить дату «выплавки» земного вещества.

Два года длился эксперимент по накоплению продуктов деления искусственно полученного плутония-224, проводимый группой американских ученых. И как только был исследован изотопный состав накопленного таким образом ксенона, оказалось, что он в точности

повторил результат, впервые полученный для метеорита.

Так было установлено, что плутоний-224 существовал в солнечной системе в момент образования метеоритов, и получено важное соотношение между количеством урана-238 и плутония в то далекое время.

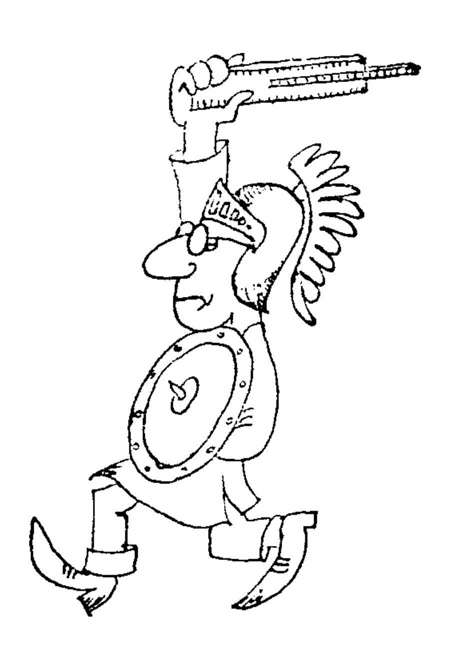
Наконец, в 1971 году в ноябрьском номере английского журнала «Природа» появилось сообщение об открытии изотопа плутония-224 на Земле. Ученые из Лос-Аламоса (США) в восьми с половиной килограммах минерала бастнезита обнаружили 20 миллионов атомов плутония-224!

Это вещество — минерал бастнезит — обладало способностью избирательно концентрировать плутоний. И по степени обогащения бастнезита этим элементом физики уточнили значение средней распространенности плутония на Земле (кстати, совершенно ничтожной).

Доказательство несомненного присутствия плутония в метеоритах и практическое исчезновение этого изотопа с лица Земли дали возможность установить, что нуклеосинтез прекратился буквально за сотни миллионов лет до образования солнечной системы.

ДЫШИТЕ ГЛУБЖЕ...







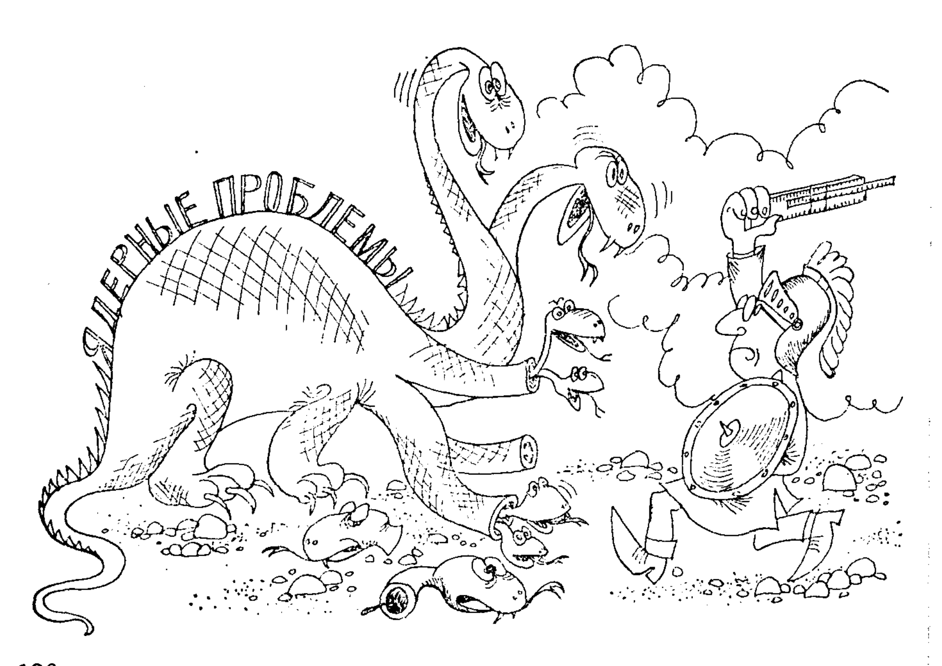
— **Получается, что, когда по атомному ядру бьют снарядами больших энергий, из него сыплются разные частицы и всякого рода сведения. А можно ли стукнуть по ядру так, чтобы ни одна частица не вылетела из него?**

— **Проще простого.**

— **Что же с ним произойдет? Расколется ли оно, как орех от удара, или, может быть, зазвенит как-нибудь ни свой лад?**

— **Второе предположение ближе к истине. Ядро действительно будет вибрировать, как выведенная из равновесия струна, до тех пор, пока не вернется в первоначальное состояние.**

Все сущее в природе неизменно следует единому стереотипу, навязываемому вторым законом термодинамики. И гигантская звезда, и невидимый атом одинаково упорно стремятся иметь минимальную энергию. Атомные ядра тоже предпочитают более спокойное положение владельцев самым минимальным запасом энергии. Но подчас и им навязывается дополнительная порция энергии, например, в ядерной реакции или при радиоактивном распаде, когда дочернее ядро получает энергию в наследство от родительского. Такие ядра физики называют возбужденными.



Слово «возбужденный», которое физики вынуждены применять по отношению к ядру, не передает всего своеобразия одного из сокровеннейших процессов в том мире, где безраздельно властвуют квантовые законы.

Один из красивейших гейзеров Камчатки невозможно увидеть в любое время. Либо он бездействует, либо выбрасывает на большую высоту струю воды и пара.

И в микромире, где энергия всегда передается определенными порциями, нет промежуточных градаций. Ядро или находится в основном состоянии с минимальной энергией, или в возбужденном.

Атомное ядро обладает высокой плотностью энергии. Это энергия связи нуклонов и их кинетическая энергия, на постоянном фоне которых формируется вещество ядерной капли.

Насыщение дополнительной энергией приводит в действие какие-то новые пружины сложнейшего механизма ядерных сил. Вот почему возбужденное ядро представляет собой очень интересный объект исследования.

Сплав, который идет на изготовление космических кораблей, инженеры подвергают специальным испытаниям для определения запаса прочности и выявления изменений в структуре.

А как себя ведет насыщенный энергией ядерный сплав из протонов и нейтронов? Какие изменения возникают в ядерном веществе на пределе прочности?

И экспериментаторы и теоретики пытаются выяснить: приходит ли в движение вся ядерная «капля», или только один из нуклонов перескакивает на более высокую оболочку?

Наблюдая за первыми ядерными реакциями, экспериментаторы убедились в том, что атомные ядра поглощают не любые, а вполне определенные порции энергии. Природа наделила каждый тип ядер сложнейшей схемой запасных состояний, или уровней, на случай приобретения дополнительной энергии.

Зная, в какой именно реакции участвовало ядро, можно вычислить полученный им избыток энергии, момент количества движения в новом состоянии. Нетрудно установить и другие параметры возбужденного уровня. Но гораздо сложнее выяснить, какие конкретно изменения произошли в ядерном веществе.

Когда ядро получает порцию энергии меньше энергии

связи одного нуклона, то, естественно, ядерный коллектив нуклонов не теряет ни одного из своих членов. В положенный момент времени ядро возвращается в нормальное состояние, испуская гамма-квант с той же энергией, что досталась ядру по распределению в ядерной реакции или перешла от родительского ядра при бета-раопаде.

Но что происходило в ядре в течение тех немногих мгновений, когда избыточная энергия находилась в его полном распоряжении?

Ядерная система нуклонов, получившая добавочную порцию энергии не более одного миллиона электрон-вольт, чаще всего, как выяснили экспериментаторы, использует ее только на коллективные движения ядерной материи. Они могут быть самыми разнообразными: это и вращение ядра-капли, и колебание его поверхности. В эти моменты капля ядерного вещества, по-видимому, может принимать самые причудливые очертания и походить то на дыню, то на грушу и даже на сферу с буграми.

Сложное ядро, состоящее из десятков или сотен нуклонов, имеет гораздо больше степеней свободы, чем например, воображаемая конструкция из многочислен ных легких шариков, соединенных между собой тончай шими упругими пружинками. Даже легкий толчок заст вит шарики описывать самые замысловатые траектори Очень трудно найти порядок, которому подчиняется дв жение всех шариков вместе и каждого в отдельнос Столь же нелегко разобраться и в закономерностях вс никновения той или иной формы общего движения н лонов.

Тем не менее физики четко установили, в каких им но ядерных реакциях образуются ядра с тем или ин типом возбуждения.

Вращающиеся возбужденные ядра, например, все возникают в тех случаях, когда ускоренная заряжен частица, задевая за край ядра-мишени, заставляет вращаться, как юлу. В последнее время в реакция тяжелыми ионами, которые своим мощным электри ским полем чиркали по поверхности ядер, удавал получать возбужденные ядра с очень высоким углов моментом вращения.

Целая армия специалистов по ядерной спектро пии (так называется область исследований возбужд

ных ядер) занимается сейчас выяснением природы и сортировкой обнаруженных в опытах многочисленных ядерных уровней. Теория помогает из огромной массы возбужденных состояний выделять группы, связанные с вращением ядра или с колебаниями его поверхности.

До самого последнего времени эксперимент и теория мирно шли рука об руку, и казалось, ничто не угрожало их взаимному согласию. Но совсем недавно новую загадку предложила реакция взаимодействия пи-мезонов с ядрами.

На Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра, которая проходила в 1975 году в американском городе Санта-Фе, одним из наиболее интересных было сообщение о неожиданном результате, впервые полученном большим интернациональным коллективом сотрудников Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, а чуть позже в Швейцарском институте ядерных исследований. При торможении пи-мезонов в веществе-мишени экспериментаторы обнаружили возбужденные ядра в совершенно невероятном для данной ситуации состоянии.

По мнению физиков, исследование ядер с помощью пи-мезонов всегда напоминает схватку с многоголовым мифическим существом — Гидрой, у которой вместо одной отрубленной головы вырастают две новые, ибо каждый новый эксперимент по поглощению пи-мезонов ядрами больше ставит проблем, чем решает.

Так было и на этот раз. Атомные ядра мишени, находящейся в пучке отрицательно заряженных пи-мезонов с малой энергией, как обычно, захватывали эти частицы с соблюдением пи-мезоатомного церемониала, то есть с очень малыми угловыми моментами. А потом с ядрами происходило что-то непонятное: мгновенно освободившись от нескольких нейтронов, ядерная капля приходила в быстрое вращение. Каким же образом удается пи-мезону закрутить так сильно ядро, не обладая необходимыми для совершения этой операции качествами?

Не имея пока поддержки от теоретиков, экспериментаторы строят разные предположения относительно того, что могло бы означать их неожиданное открытие. Возможно, большую угловую скорость всему ядру передают самые периферийные нуклоны, вращающиеся быстрее всех, которые, как мы уже знаем, и поглощают мезоны в пи-мезоатомах.

Возбужденное атомное ядро не всегда тратит полученную энергию, так сказать, на проведение внутренних мероприятий, требующих непременного участия всех нуклонов. Иногда вся порция энергии целиком передается лишь одному протону или нейтрону, которые могут перейти на другую, незанятую оболочку. В этом случае говорят об одночастичном возбуждении ядра.

И колебательные, и вращательные, и одночастичные уровни атомных ядер часто расположены вперемешку по шкале энергии. И ядро в необходимый момент выбирает то или другое из запасных состояний в зависимости от условий, при которых ему достается дополнительная энергия.

Но физики давно заметили, что некоторым ядрам для перехода в одночастичное возбужденное состояние требуется энергии больше, чем для перехода на колебательные или вращательные уровни. Только начиная с порции энергии, превышающей примерно полтора миллиона электрон-вольт, эти ядра могли использовать ее на изменение состояния отдельных нуклонов.

С чем же связано существование этой таинственной запретной зоны по энергии до первого одночастичного возбужденного состояния ядра?

Даже мало-мальски вразумительного объяснения этому обстоятельству нельзя было дать ни с помощью капельной модели, ни с позиции оболочечной. Лишь значительно позже выяснилось, что энергетическую щель между основным и первым возбужденным одночастичным уровнями создавали сверхпроводящие свойства атомных ядер.

При низкой температуре сверхпроводимость металлического проводника обеспечивается электронами проводимости, связанными в пары колебаниями кристаллической решетки. Небольшие колебания ядерного вещества в основном состоянии дополнительно (помимо ядерных сил притяжения) склеивают между собой пары нуклонов. Ни одна частица ядра не может перейти на другую оболочку, предварительно не освободившись от влияния своей соседки. Ширина энергетической щели как раз и равна энергии, необходимой для разрыва этой связи между нуклонами.

— Не может ли возбужденное ядро застрять на своем уровне?

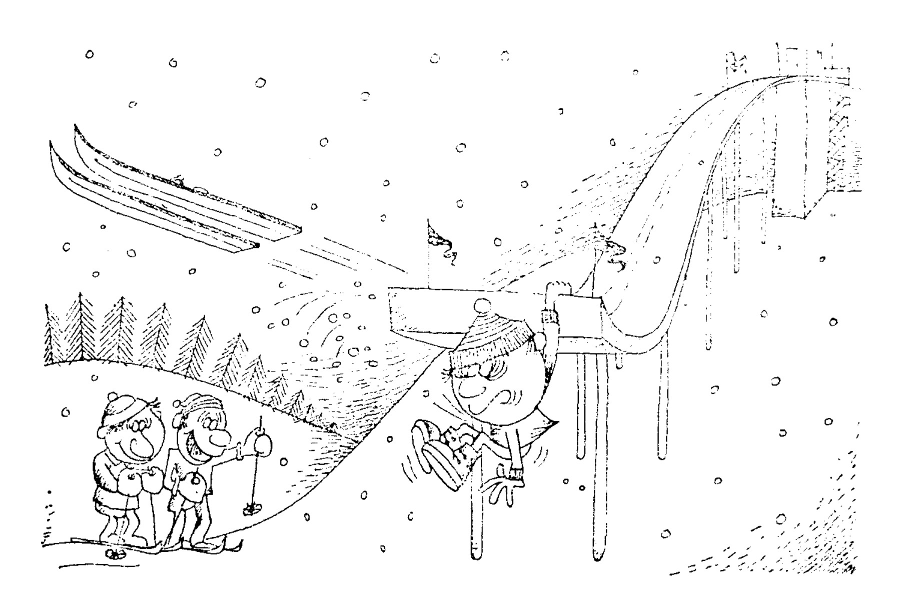
— Представьте себе, может. Обычно ядра, разряжаясь, быстро возвращаются в нормальное состояние. Но иногда они неожиданно надолго застревают в возбужденном состоянии.

— Значит, получаются какие-то новые ядра?

Ф. Содди, молодой английский химик, который вместе с Э. Резерфордом исследовал радиоактивные вещества в университете Монреаля, первый понял, что мир атомов гораздо разнообразнее мира химических элементов.

Примерно в то время, когда Э. Резерфорд обнаружил атомное ядро, Ф. Содди открыл изотопы — разновидности известных химических элементов, отличающиеся только атомными весами. Как выяснилось намного позже, ядра изотопов имели разное число нейтронов.

Сопоставляя химические и физические свойства веществ, Ф. Содди пришел к мысли, что даже изотопы не исчерпывают всего многообразия атомов, что наверняка существуют еще более похожие, но все-таки разные кирпичики материи.



Атомы «изотопов высшего порядка», как назвал их ученый, должны были, по его мнению, отличаться только радиоактивными свойствами. Но среди тех немногочисленных радиоактивных веществ, что были известны физикам в 1917 году, никто не мог обнаружить изотопов

какого-то высшего порядка; и гипотеза Ф. Содди не получила подтверждения. Лишь четыре года спустя немецкий ученый О. Ган, тот, что впоследствии открыл реакцию деления ядер урана, нашел вдруг два вещества, ядра которых действительно имели одинаковые электрический заряд и массу. Каждое из этих радиоактивных веществ состояло из особой разновидности атомов одного химического элемента — протактиния. Два типа атомов протактиния отличались только радиоактивными свойствами: имели разное время жизни.

Это и были предсказанные Ф. Содди «изотопы высшего порядка», или, как сказали бы сегодня физики, изомерная пара. Атомные ядра одного изотопа протактиния находились в основном состоянии, а другого — застряли в возбужденном.

Теоретики ничего не могли сказать по этому поводу, так как не имели тогда еще ни одной модели ядра и не знали, из чего оно состоит. В такой ситуации им проще было не придавать значения находке О. Гана. Полная неопределенность в вопросе об изомерах царила вплоть до открытия искусственной радиоактивности.

В 1935 году, когда во многих лабораториях полным ходом шли работы по получению новых изотопов, советские физики И. Курчатов, Л. Мысовский, Л. Русинов и Б. Курчатов обнаружили новую изомерную пару ядер.

И. Курчатов и его сотрудники проводили эксперименты по исследованию свойств радиоактивных атомов брома, которые возникали при облучении стабильных ядер нейтронами.

Мишень, состоящую из смеси двух изотопов брома, экспериментаторы подносили сначала к источнику нейтронов, а затем к счетчику для регистрации радиоактивного излучения. И в каждой серии измерений прибор неизменно фиксировал три сорта нестабильных атомов с тремя разными временами жизни. Но два стабильных изотопа брома, находящиеся в мишени, могли превратиться только в два же новых, радиоактивных. А как возникал третий?

Об ошибке не могло быть и речи. Эксперимент был настолько прост, что придраться было решительно не к чему. Да и тщательные химические проверки подтверждали несомненную принадлежность всех трех радиоактивных веществ именно химическому элементу брому.

Поистине достойна восхищения широта мысли и интуиция Ф. Содди, который сумел на два десятилетия раньше предвидеть подобное недоразумение. Опираясь на гипотезу об «изотопах высшего порядка» и существующие в природе два типа атомов протактиния, физики внесли существенное дополнение к заключению химической экспертизы. Бром, как ему и полагалось, имел только два радиоактивных изотопа. А третья обнаруженная экспериментаторами разновидность ядер брома состояла из изомеров его более легкого изотопа.

Изомерное ядро брома-80 оказалось вторым в длинном списке необычных возбужденных ядер. От обычных ядер, вынужденных временно находиться в состоянии с повышенной энергией, изомеры отличаются только бо́льшим временем жизни.

Возбужденное ядро, быстро спускающееся в основное состояние по ступенькам уровней энергии, иногда вдруг резко тормозит на одной из них. Вынужденная остановка может затянуться от долей секунды до нескольких дней и даже месяцев. Это и есть изомерный уровень, переход с которого квантовыми правилами запрещен.

Только с помощью модели оболочек физикам удалось разобраться в особенностях изомерного состояния. В столь неопределенном положении ядро оказывается всякий раз, когда нуклон, захвативший всю добавочную энергию, попадает на оболочку, близкую к поверхности. Он начинает с такой скоростью двигаться по орбите, что сильная инерция мешает ему перейти к более медленному движению, какое он имел на исходной нижней оболочке. С наибольшей вероятностью это происходит с ядрами, у которых число нуклонов приближается к магическим — 50, 82 и 126. Вблизи заполненных оболочек образуются своего рода островки изомерных ядер.

Явление изомерии атомных ядер — прямое доказательство оболочечной структуры ядерной материи.

В 1962 году группа физиков Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ обнаружила совершенно новый тип изомерных ядер у некоторых тяжелых химических элементов. Вокруг этого открытия до сих пор не затихают споры между теоретиками.

Ядерные капли с большим количеством нуклонов подвержены случайным изменениям формы — деформации. Даже небольшая деформация может так нарушить

равновесие между ядерными силами притяжения и электростатическим (кулоновским) отталкиванием между протонами, что капля-ядро самопроизвольно разделится на две части. Скажем, ядрам каждого трансуранового элемента свойственна определенная степень деформации и соответствующая ей вероятность деления. Но вот экспериментаторы с удивлением заметили, что среди искусственно полученных изотопов делящихся элементов встречаются ядра, у которых это событие происходит с вероятностью в 10^{26} раз большей. Эти новые «подвиды» атомов известных элементов имели одинаковую массу и разное время жизни. Несомненно, это были изомеры какой-то необычной природы.

Возбужденное ядро делящегося элемента не может быстро вернуться в нормальное состояние, испуская гамма-квант. И если бы ему были несвойственны другие способы распада, оно ничем не отличалось бы от ядер обычного изомера. Но тяжелые изомерные ядра чрезвычайно успешно использовали для разрядки реакцию деления. Поэтому время жизни этих возбужденных ядер намного меньше, чем в основном состоянии.

Столь большая способность к делению изомерных ядер требовала четкой теоретической интерпретации. Наиболее естественное объяснение заключалось в том, что форма делящихся ядер гораздо сильнее отличается от сферической в изомерном состоянии, чем в основном.

Изомерия формы — так назвали это явление — предоставляет ученым интересные возможности исследовать состояние ядерного вещества вблизи границы устойчивости по отношению к деформации.

— Можно лишь удивляться тому, как точно физики объясняют, на что именно похоже атомное ядро. А знают ли они, на что похожи «перегретые» ядра, о которых говорилось раньше? Неужели и в нагретом виде ядра — эти объекты «не от мира сего» — похожи на пресловутую каплю?

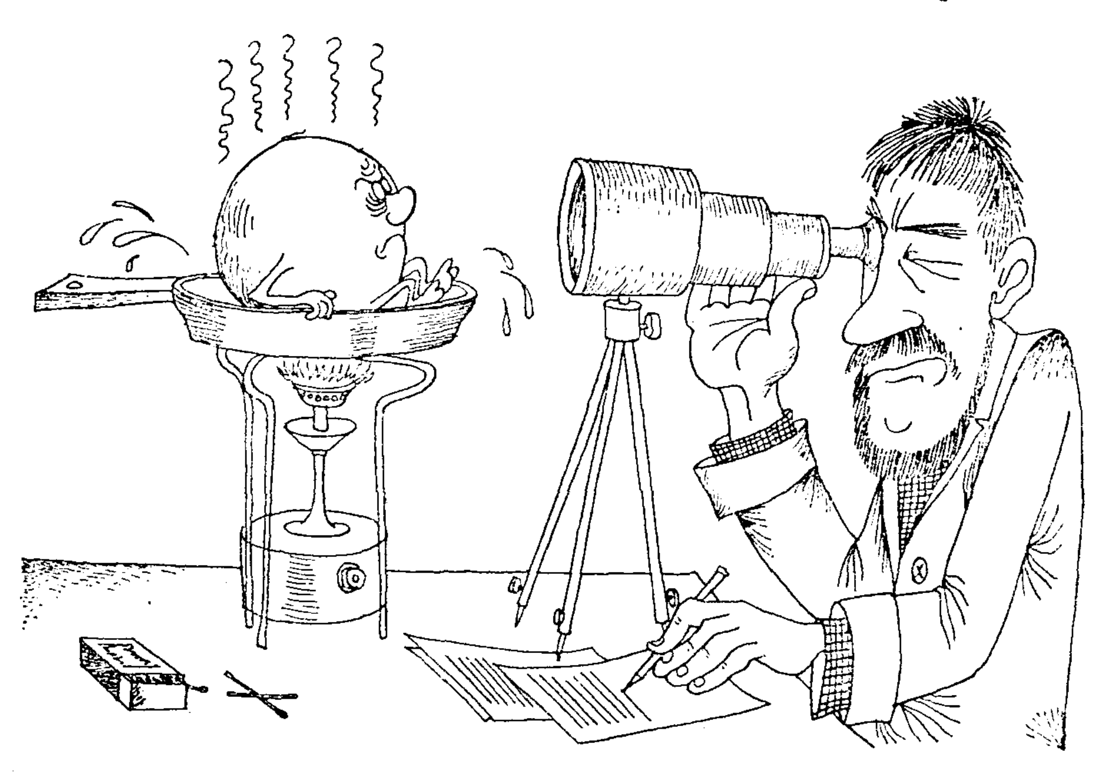
— Да. Ядро, насыщенное дополнительной энергией, напоминает каплю нагретой жидкости. Можно даже говорить об испарении нуклонов из кипящего ядра.

Герои произведений Ф. Достоевского часто рассуждают и действуют в состоянии крайнего возбуждения. В моменты предельного нравственного напряжения раскрываются самые глубокие причины совершаемых ими поступков.

Ученые хорошо понимают, что им никогда не докопаться до общих законов, управляющих динамикой и структурой ядерного вещества, если они не будут исследовать поведение ядра в предельных условиях, и в частности при очень сильных возбуждениях или «перегреве».

Априори можно сказать, что ядро, получившее энергию, большую энергии связи нуклона, обязательно потеряет одну или несколько частиц.

Но что представляет собой возбужденное ядро в тот



небольшой промежуток времени, когда оно уже не имеет прав на владение одним или несколькими нуклонами, а те еще не порвали связи с коллективом ядерных частиц. О таком необычном квазисвязанном, то есть похожем на связанное, состоянии ядерной системы можно судить, зная, как она образовалась, сколько времени просуществовала и каким образом перешла в нормальное состояние.

Во многих ядерных реакциях, в которых ядрам-участникам перепадала энергия в десятки и сотни миллионов электрон-вольт, экспериментаторы обнаруживали бурлящие перегретые ядра. Опознать их было несложно прежде всего по неимоверно большому, в ядерном масштабе, времени жизни. До 10^{-14} секунды продолжа-

лось кипение ядра-капли, пока испарение нуклонов с поверхности не приводило его в спокойное состояние.

Физики твердо усвоили, что большая порция энергии, полученная ядром, превращает его в систему быстро и хаотически движущихся частиц. Между нуклонами будто полностью обрывались те тончайшие связи, благодаря которым при малых энергиях возбуждения возникали коллективные движения в ядерном веществе, и ядро уже ничем не напоминало конструкцию из легких, соединенных между собой пружинками шариков, способных к сложным согласованным колебаниям.

Но стоило появиться синхротронам — ускорителям электронов, как представления ученых о сверхвозбужденных нуклонных системах резко изменились. Ядра-мишени с большой вероятностью поглощали электромагнитное излучение из синхротрона. Гамма-кванты с энергией 10 — 25 миллионов электрон-вольт впитывались ядрами особенно охотно. Система нуклонов переходила в квазисвязанное состояние, но совсем непохожее на кипение ядерной капли.

Это была потрясающая новость даже для физиков, которые на многое уже нагляделись, изучая микромир. На одну и ту же порцию энергии, но поданную, так сказать, под другим «соусом», ядро и реагировало по-другому. При электромагнитном взаимодействии с гамма-квантами или электронами ядро на время, равное 10^{-20} секунды, попадало в особое возбужденное состояние, при котором все протоны колебались относительно нейтронов.

Гамма-кванты и электроны, неизмеримо более осторожно повышающие тонус ядра, чем сильно взаимодействующие частицы, долгое время считались единственными инструментами, пригодными для столь тонкой операции. Но существует и еще более деликатный способ введения энергии в ядро — через слабое взаимодействие. Поглощая мю-мезон с мезоатомной орбиты, ядро, оказывается, почти незаметно для себя приобретает около 20 миллионов электрон-вольт.

Долгое время ученые отводили ядру только пассивную роль поставщика протонов для хорошо известной реакции этих частиц с мю-мезонами, происходящей по законам слабого взаимодействия. Число теоретических и экспериментальных работ, посвященных реакции ядерного мю-захвата, перевалило за сотню, когда появились

первые сомнения в правильности такого подхода. Повысив точность расчетов, физики обнаружили, что полученное из опытов значение вероятности реакции мю-захвата почти вдвое отличается от величины, предсказанной теоретиками. Это противоречие требовало радикального изменения взгляда на саму суть процесса.

И вот осенью 1963 года на межвузовской конференции в Ужгороде группа теоретиков МГУ и Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, возглавляемая профессором В. Балашовым, представила свою принципиально новую версию тех событий, которые происходят в ядре при захвате мю-мезона. Эта группа ученых смело утверждала, что ядру принадлежит решающая роль в дележе энергии между всеми участниками реакции и в способе усвоения доставшейся ему доли.

Как и при электромагнитном взаимодействии в случае поглощения гамма-квантов из синхротрона, ядерная система нуклонов на 10^{-20} секунды переходила в квазисвязанное возбужденное состояние со сложными коллективными колебаниями одних комплексов частиц по отношению к другим. Быстрая раскачка нуклонов, выявляющая какие-то удивительные, упругие свойства ядерного вещества, по идее теоретиков, происходила при попеременном возбуждении всех нуклонов в ядре.

Частица, перескакивающая на более высокую оболочку, и оставленное ею пустое место в состоянии с меньшей энергией, так называемая «дырка», в определенной последовательности возникали в ядерном веществе. В результате непрерывного «дуэта» разных «дырок» и частиц все протоны и нейтроны оказывались вовлеченными в очень сложные согласованные передвижения. Протоны могли колебаться относительно нейтронов. Частицы с одним направлением момента количества движения имели возможность перемещаться относительно частиц с моментом противоположного направления. Теоретики предполагали, что возникают даже радиальные колебания всего ядерного вещества. Ядро как бы дышало, то увеличивая, то уменьшая свой размер. Физики так и назвали этот новый тип колебаний возбужденного ядра «дыханием».

Через 10^{-20} секунды разбушевавшаяся ядерная капля успокаивалась и переходила в нормальное состояние после испускания нейтрона со строго определенной энергией.

Такое освещение событий, происходящих при слабом взаимодействии мю-мезона с ядром, подкупало тем, что вычисленное на его основе значение вероятности реакции захвата мю-мезона впервые совпало с его экспериментальным значением.

Проверить новую гипотезу можно было только одним путем: обнаружить группы нейтронов, появление которых в этой реакции она предсказывала.

За поиски нейтронов, вылетающих из мишени, облучаемой мю-мезонами, взялись физики-экспериментаторы Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ под руководством кандидата физико-математических наук В. Евсеева.

Интернациональная группа советских и польских физиков подготовила для работы на синхроциклотроне специальную установку для обнаружения нейтронов в реакции захвата мезонов атомными ядрами. В прозрачном кристалле стильбена, вещества, насыщенного водородом, пролетающий нейтрон передает свою энергию ядру атома водорода — протону. На движущийся заряженный протон прибор реагирует мгновенно. В стильбене возникает световая вспышка, которая, усиливаясь в особой лампе — фотоумножителе, превращается в электрический импульс.

Но световая вспышка может возникнуть в кристалле при попадании в него и любой посторонней заряженной частицы. Поэтому электрические импульсы от вспышек в приборе подвергались строжайшему контролю в уникальных электронных схемах, созданных специально для этого эксперимента. По форме импульса схемы надежно отсортировывали протоны от фоновых частиц. Затем электронный анализатор импульсов определял энергию этих протонов. А электронно-вычислительная машина по особой программе реконструировала спектр нейтронов по измеренному энергетическому спектру протонов.

Успешными оказались первые же опыты на ускорителе. Помещая мишени из серы, кальция или кислорода в пучок мю-мезонов, дубненские физики с волнением обнаружили долгожданные группы нейтронов. Эксперимент полностью оправдал надежды теоретиков.

Выступая на Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра в Дубне, профессор В. Балашов сказал: «Теоретикам всегда свойственно фантазировать. Но я не думал, что эксперименты по

захвату мю-мезонов ядрами будут поставлены со столь высокой точностью, что их можно будет сравнить с теорией».

Открытие, сделанное физиками Дубны, и экспериментальные результаты, полученные в других лабораториях, подтверждали очень важную для ядерной физики закономерность. И в электромагнитных, и в слабых, и даже, с небольшой вероятностью, в сильных взаимодействиях образуются атомные ядра, которые всю дополнительную энергию расходуют только на согласованные движения своих частиц.

Коллективные колебания нуклонов при высокой энергии возбуждения — это универсальное свойство ядерного вещества, связанное с особой природой ядерных сил.

— Сначала физики радовались тому, что научились добывать из ядер энергию, а теперь — непонятно почему — радуются, когда ядра ее поглощают.

— Изучение возбужденных ядер имеет большое фундаментальное значение для науки, так как обогащает представления ученых о ядерных силах. Но изомерные ядра, обладающие способностью довольно долго удерживать полученный избыток энергии, могут быть использованы в практических целях.

— Я что-то ничего не слышал об «аккумуляторе» на возбужденных изомерных ядрах.

— И не могли ничего слышать. В качестве длительно работающего аккумулятора ядерной энергии оказалось выгодней использовать радиоактивные изотопы. А изомеры чрезвычайно пригодились после того, как удалось наладить связь на гамма-квантах между одинаковыми ядрами.

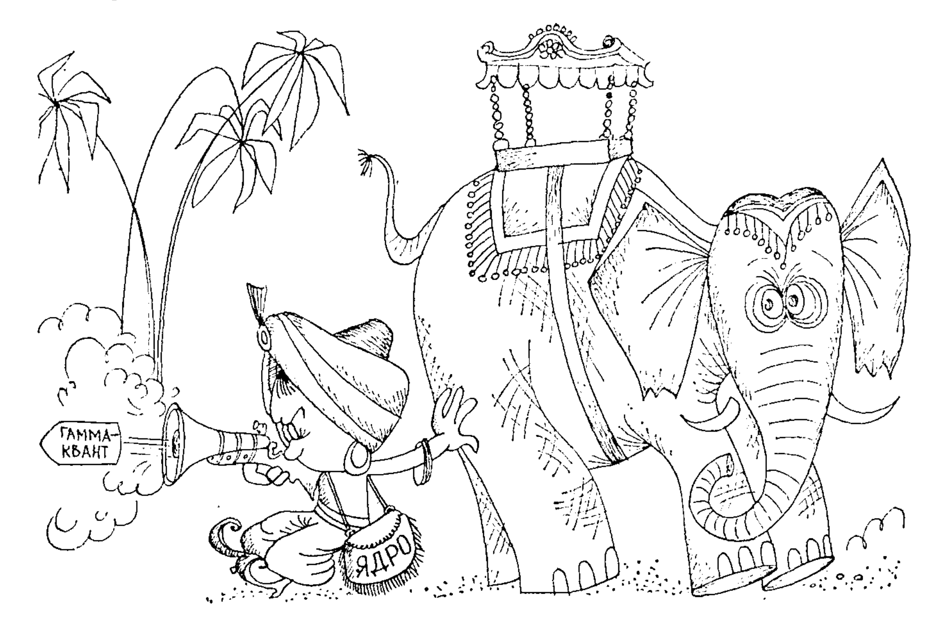
До сих пор мы говорили и продолжаем говорить о проблемах, относящихся непосредственно к атомным ядрам, но сейчас крайне необходимо вспомнить о давно открытом в мире атомов избирательном, или, как называют его физики, резонансном, поглощении фотонов с определенной энергией. Свет, испущенный возбужденным атомом, с максимальной вероятностью захватывается другим атомом того же химического элемента. Это естественное поведение любых квантовых объектов.

Заручившись поддержкой закона сохранения энергии и представлениями о возбужденных состояниях атомных ядер, физики еще 45 лет назад попытались обнаружить

резонансную связь на фотонах с большими энергиями (их называют еще гамма-квантами) между ядрами.

Но испущенные ядром, возвращающимся в нормальное состояние, уже апробированные, так сказать, гамма-кванты неожиданно оказались совершенно непригодными для возбуждения других ядер того же сорта.

Конечно, в то время экспериментальная техника была очень примитивна, но проста и сама идея эксперимента. Установка выглядела так: в источнике находились изомерные ядра, а в мишени — точно такие же ядра, но



в основном состоянии. За мишенью располагали счетчик гамма-квантов. По скорости отсчетов в детекторе можно было понять, поглощают ядра мишени резонансные гамма-кванты или нет. Ни в первой, ни во второй, ни в десятой попытке обнаружить это явление не удалось. Гамма-кванты беспрепятственно проходили через мишень и попадали в счетчик.

Пятнадцать лет бились ученые над решением проблемы этой феноменальной, упорной неконтактабельности одинаковых атомных ядер. Бились до тех пор, пока не была вскрыта — именно вскрыта, а не устранена — причина этого непонятного поведения ядер.

И возбужденное ядро, и возбужденный атом — это, в сущности, одноволновые передатчики. Квант света фиксированной частоты, излучаемый атомом химического элемента, может быть принят только единственным квантовым приемником — атомом того же элемента. Ядерный гамма-квант, которому тоже соответствует длина волны определенной частоты, может возбудить такое же стабильное ядро-приемник.

У атомных и ядерных приемников и передатчиков нет ручек для изменения настройки. Для атомов она и не требовалась: фотонная связь между ними работала отлично. Ядерный же приемник ядерные гамма-кванты не принимал и молчал.

В обычной радиоаппаратуре настройка может испортиться из-за какой-нибудь перегоревшей детали. Но что может перегореть в ядре?

Законы квантовой механики, в частности принцип неопределенности В. Гейзенберга, устанавливают интервал энергий, в пределах которого должен наблюдаться резонанс и в атоме, и в ядре. Этот интервал, называемый шириной резонансной линии, обратно пропорционален времени жизни ядра в возбужденном состоянии. Например, для ядер железа-57, которые удерживают избыток энергии примерно 10^{-7} секунды, ширина линии равна 10^{-8} электрон-вольта.

У изомерных ядер время жизни и интервал энергии излучаемых фотонов, в котором мог наступить резонанс, были почти такими же, что и у атомов. А установить гамма-связь между ядрами так и не удавалось.

Наконец в 1945 году молодые советские ученые И. Барит и М. Подгорецкий впервые открыли всем глаза на обстоятельство, которое до тех пор упускалось из виду. Закон сохранения энергии мог гарантировать успех ядерной связи на гамма-квантах, но он мог также и жестоко карать физиков за оплошность, допущенную по отношению к нему. А оплошность была достаточно серьезной. В своих подсчетах ученые почему-то не учитывали ту небольшую энергию, которую получало ядро в момент отдачи при вылете из него гамма-кванта.

Эта сложнейшая система из элементарных частиц, связанных воедино уникальными ядерными силами, стреляя гамма-квантом, претендовала на свою долю энергии отдачи, как обычный макрообъект.

Энергия взрыва пороха делится между пулей и винтовкой в точном соответствии с их массами: большую часть получает легкая пуля, но кое-что достается и винтовке. Излишек ядерной энергии точно таким же

образом распределяется между ядром и гамма-квантом: почти вся энергия достается фотону, а ядру перепадает ничтожнейшая ее доля.

Про отдачу ядра не то чтобы забыли, просто не придавали ей никакого значения. Всех успокаивал качественный вывод о том, что энергия гамма-кванта сохраняется практически нетронутой. Энергия отдачи никогда не фигурировала и в атомном резонансе, там ее величина, приблизительно равная 10^{-10} электрон-вольта, была намного меньше ширины резонансной линии и не могла расстроить фотонную связь.

Но между атомными и ядерными передатчиками была одна колоссальная разница: они работали в разных энергетических диапазонах. Атомы испускали энергию порядка нескольких электрон-вольт, а ядра — миллионы электрон-вольт. Ясно, что и при дележе энергии между каждым из этих микрообъектов и соответствующими квантами электромагнитного излучения ядру доставался неизмеримо больший пай, чем атому.

В ядерном гамма-резонансе одна десятимиллионная доля энергии, которую забирало себе, например, то же ядро железа-57, равна примерно 10^{-3} электрон-вольта. Порция сама по себе ничтожно малая, и все-таки она в 10^{5} раз больше всего интервала резонансной энергии.

Отдача ядра, которую физики раньше сбрасывали со счетов, едва заметным образом меняя энергию гамма-квантов, в то же время полностью лишала их способности поддерживать резонансную гамма-связь с другими ядрами. Какая уж тут коммуникабельность! Искать в таких условиях ядерный гамма-резонанс — это все равно что пытаться принять, например, в Москве радиостанцию Сиднея при сильнейшем фединге.

Но в особых условиях ученым все-таки удалось наладить гамма-связь между ядрами. Ядро, испытывающее отдачу, и вылетающий из него гамма-квант с меньшей энергией, или, что то же самое, с меньшей частотой, движутся в противоположные стороны. Перед нами давно известный физикам эффект Допплера.

Со звуковым вариантом этого эффекта, наверное, знаком каждый. Свисток тепловоза, удаляющегося от перрона вокзала, слышится нам более низкой частоты, чем тот же свисток прибывающего. Частота колебаний волн, распространяющихся в сторону, противоположную движению источника звука, уменьшается.

К счастью, с допплер-эффектом можно бороться. Если источник, содержащий возбужденные изомерные ядра, двигать в сторону мишени, то можно скомпенсировать изменение частоты попадающих в нее гамма-квантов.

Правда, подсчитав, с какой скоростью надо двигать излучатель, физики махнули было рукой на все свои надежды по использованию ядерного гамма-резонанса. Оказалось, отдачу можно было компенсировать, двигая ядра... со скоростью звука.

Несмотря на столь жесткие условия, экспериментаторам удалось зарегистрировать резонанс в тот момент, когда мимо покоящейся ртутной мишени и счетчика на плече ультрацентрифуги проносились возбужденные ядра ртути. Нельзя сказать, что это был очень удобный метод исследования гамма-резонанса.

Впрочем, тот, кто не выносил воя центрифуги, мог выбрать другой вариант: например, нагревать ядра-излучатели до температуры в несколько тысяч градусов. В этом адском пекле ядра тоже приобретали скорость, необходимую для компенсации отдачи. Но далеко не каждая лаборатория могла воздвигнуть собственную домну для подобного эксперимента.

И вдруг все переменилось к лучшему. Выброшены были центрифуги и потушен был наконец почти солнечный огонь, который бушевал в лабораториях.

Немецкий физик Р. Мессбауэр в 1958 году показал, как легко и просто наблюдать гамма-резонанс, если предварительно принять некоторые меры по ликвидации отдачи ядра. Молодой ученый стал единственным человеком в мире, который употреблял длинное название «ядерный гамма-резонанс без отдачи» вместо принятого всеми короткого термина, обозначающего это явление,— «эффект Мессбауэра».

Научный сотрудник Гейдельбергского института имени М. Планка Р. Мессбауэр для работы над диссертацией получил от своего шефа тему, которая называлась «Исследование резонансного поглощения гамма-квантов». Планировалось традиционное изучение свойств этого явления с помощью сильного нагревания ядер передатчиков и приемников. Но диссертант пошел своим, оригинальным путем к решению поставленной перед ним задачи. Он сообразил, как, обойдясь без нагревания, можно почти полностью избавиться от отдачи ядра.

Р. Мессбауэр проверил свою идею на опыте и описал ее в диссертации на соискание ученой степени доктора философии. К моменту опубликования диссертации автору было 29 лет, а через три года он получил в Стокгольме Нобелевскую премию по физике.

Р. Мессбауэр не был ни магом, ни волшебником и не мог отменить законы природы. Ученый понял, как повлиять на распределение энергии между гамма-квантом и ядром в пользу гамма-кванта.

Все знают, что если винтовку опереть о стенку, то отдача при выстреле будет незначительной. Масса винтовки за счет массы стены увеличится настолько, что пуле достанется почти вся энергия, выделяющаяся при взрыве пороха.

«Конечно, — сказал Р. Мессбауэр в лекции, прочитанной несколько лет назад в Москве, — приковать ядра к стене не так-то просто. Однако можно попытаться сделать это, взяв вместо одного атома в газообразной фазе набор атомов в виде кристаллов».

Химические силы надежно приковали атомы, содержащие возбужденные ядра-изомеры, к кристаллической решетке, которая играла роль стены и практически сводила на нет отдачу ядра при испускании гамма-квантов.

Эффект Мессбауэра очень скоро нашел широкое применение. С его помощью можно было измерять невероятно малые изменения энергии гамма-квантов. Чувствительность этого метода намного превосходила все достигнутое к настоящему времени в любых областях физики.

— Все это очень интересно, но какое отношение имеет эффект Мессбауэра к вопросу об использовании ядер-изомеров?

— Самое прямое. Без открытия этого эффекта нельзя было и мечтать о создании ядерного лазера.

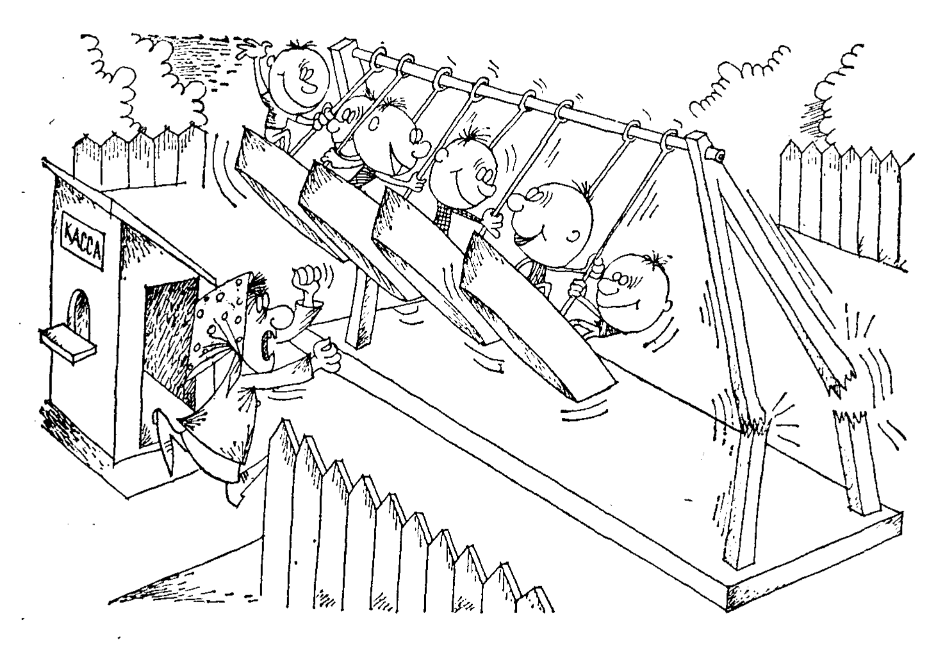
— Лазера? Неужели можно управлять возбужденными ядрами?

— Физики надеются получить пучок ядерных фотонов с помощью гамма-резонанса без отдачи.

Французский ученый А. Пуанкаре писал, что «всякой истине суждено одно мгновение торжества между бесконечностью, когда ее считают неверной, и бесконечностью, когда ее считают тривиальной». Но теории, созданные одним из крупнейших ученых XX века, А. Эйнштейном, как-то выпадают из того длинного ряда гипотез, довольно быстро переживших свое мгновение торжества.

Интересный результат, полученный А. Эйнштейном в то время, когда он занимался проблемой излучения и поглощения фотонов, лишь 60 лет спустя был реализован в одном из самых замечательных приборов наших дней — в лазере.

Возбужденные атомы обычно испускают кванты света столь же несогласованно, как несогласованно звучат инструменты, настраиваемые музыкантами перед концертом. Но когда маэстро взмахивает палочкой, рождается мелодия, возникающая в результате упорядоченного звучания всего оркестра.



Оркестром возбужденных атомов, как предсказывала теория, можно управлять с помощью электромагнитного излучения той же частоты, что и свет, который испускают возвращающиеся в нормальное состояние атомы. Множество заранее подготовленных возбужденных атомов, подчиняясь приказу о немедленном возвращении в основное состояние, все разом отдают свой избыток энергии.

Замечательный английский физик М. Фарадей, размышляя о драгоценных камнях — рубинах и бриллиантах, писал: «Ни один из этих драгоценных камней не

может соперничать по своей яркости и красоте с очарованием пламени». Луч красного цвета из рубинового лазера не уступает по красоте и очарованию пламени, а по «качеству» света оставляет его далеко позади. Все атомы лазера работают самосогласованно, как один.

Если б можно было наблюдать за каждым из лазерных атомов, мы бы увидели, что их колебания синхронизованы по фазе. Поэтому излучение всех атомов сливается как бы в единую волну. Такой свет называется когерентным.

В самом начале нашего века о ядрах еще ничего не было известно, и А. Эйнштейн в своих рассуждениях имел в виду только атомы. Но выводы его теории целиком и полностью применимы к излучению и поглощению ядерных гамма-квантов. То есть фотонов с энергией, в миллионы раз большей.

В гамма-лазере, или газере, как сокращенно называют его физики, должны работать возбужденные заранее атомные ядра, выдавая управляемое электромагнитное излучение точно такого же высшего качества, как и в оптическом лазере.

Чудесный лазерный свет произвел переворот уже во многих отраслях науки и техники. Еще большую революцию, например в биологии, произведет когерентное электромагнитное излучение газера с длиной волны, меньшей размера атома. Чтобы проникнуть в тайны живого, ученым необходимо иметь возможность рассмотреть детали строения молекул белков, генов. С помощью лазерных гамма-квантов можно будет изучать в живых тканях даже движение отдельных макромолекул.

Синхронное излучение возбужденных ядер позволит получить не только объемную картину молекулы ДНК в клетке, но и снять объемный кинофильм о процессе удвоения ДНК, о синтезе белков в рибосомах. Газер может дать очень короткий импульс излучения до 10^{-15} секунды. Поэтому при освещении газерным светом в каждом кадре этого уникального фильма можно будет увидеть «замороженные» во времени тепловые колебания молекул. Почему же до сих пор не создан ядерный гамма-лазер?

Создание газера — дело необычайной сложности. Оно потребует участия в нем многих лабораторий и институтов, предельных усилий ума и использования новейших достижений техники.

Говорят, что прибор, эксперимент и физическая проблема, которую он решает, — хлеб, любовь и фантазия физика-экспериментатора. И если фантазируют чаще всего теоретики, а их претензии к любви все возрастают, то хлеб навсегда и безвозмездно принадлежит экспериментаторам. Сейчас ученые широко обсуждают главную проблему, которую необходимо решить, прежде чем приступать непосредственно к сборке сложнейшей установки. Пока нет четкого мнения о том, как собрать в рабочем веществе газера достаточно большое количество возбужденных атомных ядер.

В рубиновом лазере атомы хрома легко возбуждаются светом от мощной разрядной электронной лампы, но атомные ядра светом не возбудить. Для этого необходимы ядерные реакции.

Советский физик Л. Ривлин в 1961 году впервые предложил схему создания ядерного лазера на мессбауэровском излучении без отдачи. Кристалл более чем наполовину обогащается долгоживущими возбужденными ядрами — изомерами. И достаточно хоть одному «разрядиться», как его гамма-квант послужит сигналом для всех остальных ядер, и газерный оркестр заработает. Но увы... Вместо чарующей мелодии мы бы услышали какофонию звуков, какую мог бы издавать небезызвестный квартет из басни И. Крылова.

На возбуждение ядер нейтронами, на выделение их из мишени и кристаллизацию требуется минимум несколько дней. Изомеры с таким временем жизни существуют, но ширина резонансной линии у них настолько мала, что становятся заметными ее искажения, связанные с дефектами кристаллической решетки. Эти искажения, неодинаковые у разных ядер, грубо нарушают ядерный гамма-резонанс.

Не лучше ли будет, если сделать газер на короткоживущих изомерах, как это предлагают советские ученые В. Гольданский и Ю. Каган? Сразу отпала бы забота о дефектах кристаллической решетки и слабых магнитных взаимодействиях между ядрами, тоже меняющих энергию резонансных гамма-квантов. Их влияние оказалось бы просто незаметным при той ширине линии, которая соответствует времени жизни возбужденных ядер порядка 10^{-2}—10^{-6} секунды.

Но как за столь короткое время успеть проделать все необходимые предварительные процедуры?

Кажется, что ни за что не успеть обеспечить ядрам реакцию захвата нейтронов, выделить возбужденные изомеры и создать из них кристаллическое тело газера. Чтобы не попасть в цейтнот, физики предлагают обойтись без двух последних операций и сосредоточить все внимание на одной, заключающейся в следующем.

Сначала приготавливается кристалл, содержащий ядра, которые предстоит превратить в изомеры. Затем мощнейший поток нейтронов, приблизительно такой, что образуется при ядерном взрыве, за миллионные доли секунды возбуждает атомные ядра. Как будто газер готов?

Нет. Беда в том, что облучение нейтронами губительно для кристалла, он слишком перегревается и может разрушиться. Поэтому совершенно необходимо вынести из зоны облучения нейтронами рабочее вещество газера, где будут излучаться гамма-кванты.

Так ко всем предыдущим операциям добавляется еще одна, которую необходимо выполнить за те же миллионные доли секунды. Надо либо перенести в другой кристалл созданные изомерные ядра, либо перекачать в этот второй кристалл всю драгоценную энергию, накопленную в момент облучения нейтронами.

Конечно, энергия не вода, которую перекачивают по трубам, но в данном случае не нужны и провода, по которым обычно подается электроэнергия. Изомеры с помощью резонансных гамма-квантов могут передать свою энергию таким же стабильным ядрам второго кристалла и превратить его в готовый для работы гамма-лазер. Пока идет обсуждение и проблемы в целом, и отдельных операций. Работать с долгоживущими изомерами намного удобнее, и сейчас детально обдумывается любая возможность уменьшения искажения ширины резонансной линии.

Дилемма, стоящая перед теми, кто занимается проблемой гамма-лазера: или большое время жизни изомерных ядер, или очень малая ширина резонансной линии — сегодня уже не кажется неразрешимой. Специалисты по кристаллографии достигли значительных успехов в выращивании так называемых бездефектных кристаллов. А физики предлагают защищаться от искажений, связанных со слабым магнитным взаимодействием между ядрами в кристаллической решетке, с помощью внешнего радиочастотного поля.

Но, может быть, первым заработает гамма-лазер, параметры которого подобраны по принципу золотой середины. Такой вариант газера с применением эффекта Мессбауэра предложил советский ученый В. Летохов. По его мнению, в будущем приборе гамма-кванты должны испускать изомеры с не очень длинным, но и с не очень коротким временем жизни: от 0,1 секунды до 10 секунд. Для возбуждения этих изомерных ядер не требуются и слишком мощные потоки нейтронов. Необходимое для работы газера количество изомеров можно получить с помощью действующих ядерных реакторов. Однако в отличие от предыдущих вариантов здесь рабочее вещество газера должно пройти через такие сложные процедуры, каким не подвергается ни один материал даже в самом сложном производстве.

Прежде всего предстоит извлечь возбужденные ядра из вещества мишени, которая побывала в нейтронном потоке. И самым быстрым из них представляется почти фантастический способ, опирающийся на последние достижения науки и техники, который натурфилософы XVII века попросту назвали бы «дематериализацией».

Короткий мощный лазерный луч разбивает мишень на отдельные атомы. Еще два лазера, лучи которых направлены на газовую струю из смеси продуктов испарения, избирательно ионизируют атомы, содержащие возбужденные ядра-изомеры. Электромагнитная фокусирующая система легко собирает эти ионы, и возбужденные ядра оседают, «материализуются», на заряженной нити или пленке. Мгновенной кристаллизацией и заканчивается весь сложный процесс изготовления рабочего вещества гамма-лазера.

В. Летохов полагает, что современное состояние ядерной и лазерной техники позволяет приступить к практическому решению вопросов, связанных с разработкой такого газера.

И экспериментальные и теоретические исследования «запасных» ядерных уровней, которые, как раньше казалось, имели чисто научно-теоретическое значение, оказались чрезвычайно необходимыми. Без знаний, добываемых спектроскопистами, не построить уникальный прибор будущего — ядерный гамма-лазер.

Сейчас предлагается широкая программа изучения проблем в разных областях науки и техники, имеющих непосредственное отношение к получению когерентного

гамма-излучения. Возможно, в самое ближайшее время появятся новые, кардинальные идеи, осуществление которых ускорит разработку конкретного проекта ядерного гамма-лазера.

Появление газеров в лабораториях откроет новые горизонты перед исследователями атомных ядер. Обычные лазеры стимулировали развитие новой области науки, так называемой нелинейной оптики. Были открыты новые явления при взаимодействии лазерного света со средой. Мощные лазерные пучки, проходя через вещество, преобразовывают его и тем самым изменяют условия взаимодействия фотонов с атомами и молекулами.

По-видимому, газеры приведут к созданию аналогичного научного направления — нелинейной ядерной физики, которая будет изучать ядерные процессы, происходящие под действием мощного потока совершенно одинаковых гамма-квантов.

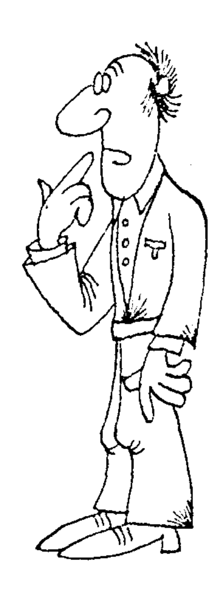
Не раз и не два случалось так, что физики находили в естественных условиях — в космосе — то, чего поначалу не могли создать или найти на Земле. Например, химический элемент гелий впервые был обнаружен в спектре Солнца (греческое слово «гелиос» означает «солнечный»). Многие элементарные частицы, в том числе и первые вестники антимира позитроны, были открыты сначала в космических лучах.

Доказано, что в космосе «работают» мазеры — усилители радиоволн в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. А может быть, Галактика посылает нам и удивительное синхронное гамма-излучение, которое еще никто не наблюдал на Земле?

Не так давно ученые зарегистрировали грандиозные по мощности вспышки гамма-лучей в некоторых участках космического пространства с длительностью от долей секунды до одной минуты. Внеземные гамма-кванты имели энергию от 0,05 до 1,5 миллиона электрон-вольт. Механизм возникновения таких вспышек пока неясен, но, может быть, это работает естественный гамма-лазер: газер!

ТАЛАНТЛИВЫЙ ПОДРАЖАТЕЛЬ







— Ядро оказалось очень сложной штукой, и, видимо, физики, изучая элементарные частицы, стремятся к упрощению?

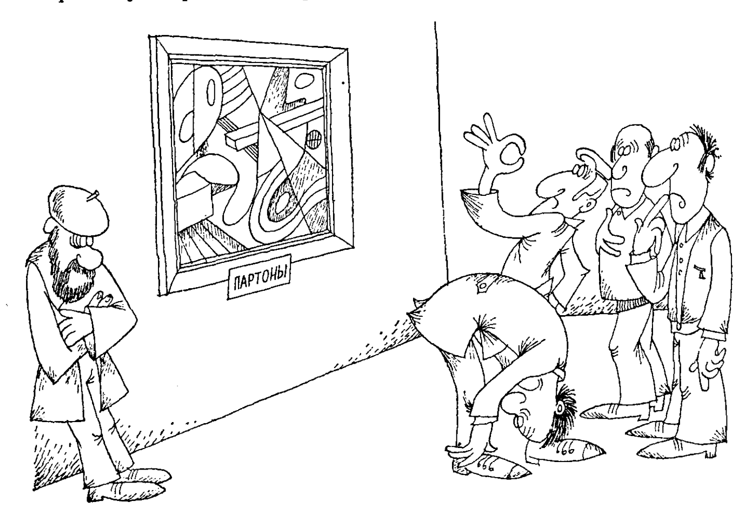
— Поначалу так и казалось. Но постепенно в поведении элементарных частиц раскрылись такие бездонные глубины неведомого и необычного, что физики-элементарщики вновь обратились к ядерной физике.

— Это непонятно. По-моему, ядро так же непохоже на отдельную частицу, как сложное многоклеточное существо на амебу?

— Однако это же самое ядро, ускоренное до большой энергии, способно имитировать элементарную частицу.

В октябре 1970 года на ученом совете Объединенного института ядерных исследований в Дубне член-корреспондент АН СССР А. Балдин рассказал о первых экспериментальных результатах, полученных в новой области науки — релятивистской ядерной физике, родившейся в Лаборатории высоких энергий.

Синхрофазотрон этой лаборатории, созданный еще под непосредственным руководством академика В. Векслера, давно находился на положении экс-чемпиона по энергии ускоряемых протонов. Некоторые его конструк-



тивные особенности привлекали исследователей, и они решили омолодить синхрофазотрон-ветеран.

Инженеры и ученые социалистических стран претворили в жизнь остроумную идею, предложенную группой специалистов, и превратили морально устаревшую гигантскую установку в первый в мире ускоритель для получения релятивистских атомных ядер, то есть ядер, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Энергия, которую приобретает в этом ускорителе атомное ядро, во столько раз больше, чем у протона, во сколько раз его электрический заряд больше заряда протона. Так, ядро кальция в принципе можно разогнать до 200 миллиардов электрон-вольт.

Новое научное направление, идейная, а затем и экспериментальная основа которого была впервые создана в ОИЯИ, помогло замкнуть в единую систему такие отдельные области исследования микромира, как ядерная физика и физика элементарных частиц.

Раньше мы говорили только о прикладных, если так можно сказать, связях физики ядра и физики частиц высоких энергий. В основном они сводились к использованию элементарных частиц в тех экспериментах, где надо было выявить структуру и свойства ядерного вещества.

Но в последние годы физики-элементарщики подметили глубокую аналогию между ядерными реакциями при больших энергиях и теми реакциями, в которых участвуют элементарные частицы, и решили обратиться за помощью к релятивистской ядерной физике в решении самой сложной и наиболее важной из стоящих перед ними проблем — создании теории сильных взаимодействий.

Даже при поверхностном знакомстве с результатами исследований элементарных частиц бросается в глаза одно парадоксальное обстоятельство: большинство реакций, вызываемых ускоренными частицами, сопровождается сильными взаимодействиями между ее участниками, а теория этого взаимодействия до сих пор остается наименее разработанной.

Со времени Э. Резерфорда, впервые наблюдавшего, как ведут себя на близком расстоянии альфа-частица и атомное ядро, физики только тем и занимаются, что сталкивают ядерные частицы, получая сведения, необходимые для построения теории. Они считают, что раскроют все тайны и решат все загадки сильного взаимодействия в том случае, если заставят, например, про-

тоны подойти как можно ближе друг к другу. Экспериментаторы добиваются этого, сообщая протонам с помощью ускорителей все большую энергию.

Но мир элементарных частиц, который не может существовать вне своей питательной среды — огромной энергии, — очень чутко реагирует на ее изменение. Предсказания о поведении частиц в новом энергетическом диапазоне, основанные на наблюдениях за ними при меньших энергиях, сбываются очень редко.

Перед протонами, имеющими скорость, близкую к скорости света, открываются, как правило, совсем другие возможности, чем перед протонами, обладающими небольшой скоростью. А это означает, что экспериментаторы всякий раз имеют дело как бы с совершенно незнакомым объектом, который предстоит изучить заново. Желанная цель — открытие законов, управляющих сильными взаимодействиями, — отступает все дальше по мере продвижения к ней, как отступает горизонт перед усталым путником. И сегодня описание простейшего, казалось бы, события — встречи протона большой энергии с другим протоном — одна из наиболее острых проблем физики высоких энергий.

Что же превратило реакцию столкновения двух ядерных частиц в обильный источник труднейших вопросов?

Мощные ускорители разгоняют протоны столь сильно, что соответствующая им по квантовой механике длина волны становится на три порядка меньше размера самой частицы. Это, в свою очередь, делает ядерную реакцию далеко не безразличной к внутреннему устройству протонов: во взаимодействии двух частиц, по сути дела, проявляется взаимодействие между собой их составных частей.

Какими же видят друг друга сближающиеся протоны огромных энергий?

В том-то и дело, что физики не знают, какую структуру имеют адроны (мы уже говорили, что адроны — это общее название всех сильновзаимодействующих частиц), а поэтому и не могут себе представить, как произойдет столкновение всего двух элементарных частиц.

Экспериментаторы добросовестно делают свое дело— скрупулезно, по крупинкам, собирают разрозненные и отрывочные сведения о поведении адронов. Теоретики на этой основе создают схемы строения адронов и моделируют реакции элементарных частиц при больших энергиях. Круг познания — наблюдение, осмысливание, предсказание, проверка, — замыкаясь, выявляет истину. На сегодня она состоит в том, что, подобно ядру, которое то проявляет себя как капля ядерного вещества, то похоже на группу собравшихся зачем-то вместе независимых нуклонов, адроны тоже подчас демонстрируют совершенно противоположные свойства.

Группа дубненских физиков под руководством доктора физико-математических наук В. Никитина сначала на Серпуховском ускорителе, а затем совместно с американскими учеными на ускорителе в Батавии (США) исследовала одну и ту же реакцию — упругое рассеяние протонов больших энергий на протонах. То есть такое взаимодействие между частицами, когда налетающий протон расходует всю свою энергию только на изменение скорости протона-мишени; как это происходит, например, при ударе одного бильярдного шара о другой.

Цель этих опытов — измерение радиуса протона при разных энергиях столкновения. Мишень — газовая водородная струя — облучалась протонами с энергией от 10 до 400 миллиардов электрон-вольт. Результаты оказались несколько неожиданными: размер протона увеличивался с увеличением скорости сталкивающихся частиц.

И с этим представлением о протоне как о чем-то монолитном, занимающем бо̀льшую или ме́ньшую, но вполне измеримую область пространства, приходится увязывать совсем иной образ этой частицы. Образ, который возникает при исследовании другого варианта этой же реакции — неупругого рассеяния очень быстрых протонов на протонах. В этом последнем случае аппаратура регистрировала протоны, отклонившиеся на большие углы и потерявшие значительную часть своей энергии. Эта энергия передавалась протону-мишени и шла не на изменение его скорости, а на изменение его внутренней структуры, на рождение новых частиц.

Легко вообразить, каково было изумление ученых, когда обнаружилось, что характер изменения числа отклоненных частиц в зависимости от величины угла точно такой, какой был найден Э. Резерфордом для альфа-частиц, рассеянных тонкими пленками вещества.

Э. Резерфорд, обнаружив альфа-частицы, которые отклонялись на угол до 180 градусов от первоначально-

го направления, сразу высказал гипотезу об атомном ядре. То есть о том, что в атоме есть нечто, сравнимое по массе с альфа-частицей и способное резко изменить направление ее движения.

Аналогичный вывод, теперь уже по отношению к элементарным частицам, вынуждены были сделать и современные ученые. Ускоренные электроны и протоны, сталкиваясь с протонами-мишенями, передавали свою энергию каким-то внутрипротонным структурным единицам.

Словом, отчего ушли, к тому и пришли. Всего семь лет назад атомные ядра и нуклоны казались телами разного порядка сложности. А теперь, в новых энергетических условиях, бывшие элементарные частицы сами стали походить на ядра, заполненные нуклонами.

Теоретики давно предлагали так называемые составные модели фундаментальных элементарных частиц. Наиболее интересной из них оказалась кварковая модель. Адроны в этой модели выглядели состоящими из определенного числа гипотетических частиц — кварков — с дробным электрическим зарядом.

Атомные ядра, состоящие из нуклонов, могут служить вполне реальной моделью элементарной частицы, состоящей из кварков, а столкновения релятивистских ядер — имитировать столкновения протонов больших энергий.

Экспериментаторы нашли неоспоримые доказательства тому, что нуклон — это протяженный составной объект. Но чтобы создать теорию, правильно описывающую поведение адронов при высоких энергиях, когда их скорости близки к скорости света, надо было детально разобраться в том, как они устроены.

Релятивистская ядерная физика — научное направление, которое возникло в ОИЯИ, — дает новый подход к этой проблеме, подводит материальную базу под уже существующий обмен идеями между физикой ядра и физикой элементарных частиц.

Ускорение ядер до скоростей, близких к скорости света, — задача чрезвычайно сложная. И легко представить, с каким интересом ведущие ученые социалистических стран рассматривали демонстрировавшиеся на XXIX сессии ученого совета ОИЯИ во много раз увеличенные первые снимки следов релятивистских ядер.

Эти уникальные фотографии ученые назвали «автографами» дейтона — первого составного ядра, ускоренного на синхрофазотроне.

Сейчас физики Дубны наблюдают не только за поведением в веществе простейшей связанной системы из протона и нейтрона с энергией в 11 миллиардов электрон-вольт, но и за ядрами химического элемента гелия и углерода, ядра которого ускоряются до 60 миллиардов электрон-вольт. Исследования в области релятивистской ядерной физики, начатые в лаборатории высоких энергий в 1970 году, подхвачены и интенсивно развиваются американскими физиками.

— Обычно все с удовольствием смотрят на выступления имитаторов, но каждый понимает, что даже самый талантливый артист не может заменить оригинал. Наверняка и релятивистские ядра передают только внешнее или скорее внутреннее сходство с частицами, а действуют по своим ядерным законам.

— Не стоит говорить об этом столь категорично. Известно, например, что взаимодействия релятивистских ядер подчиняются новой закономерности мира элементарных частиц — масштабной инвариантности.

Главный узел из самых животрепещущих проблем физики высоких энергий завязался сейчас в теоретическом моделировании тех процессов, в которых при столкновении двух нуклонов рождается большое количество новых частиц.

Реакции множественного рождения, как величают их физики, — наиболее интересный результат общения между нуклонами с самыми большими энергиями. Изучению этих сложнейших процессов микромира и посвящают большую часть своего времени экспериментаторы, работающие на самых крупных ускорителях. Они еще и еще раз убедились в том, что и эти реакции происходят по строгим законам сохранения зарядов, энергии, импульса и что фундамент физики по-прежнему непоколебим.

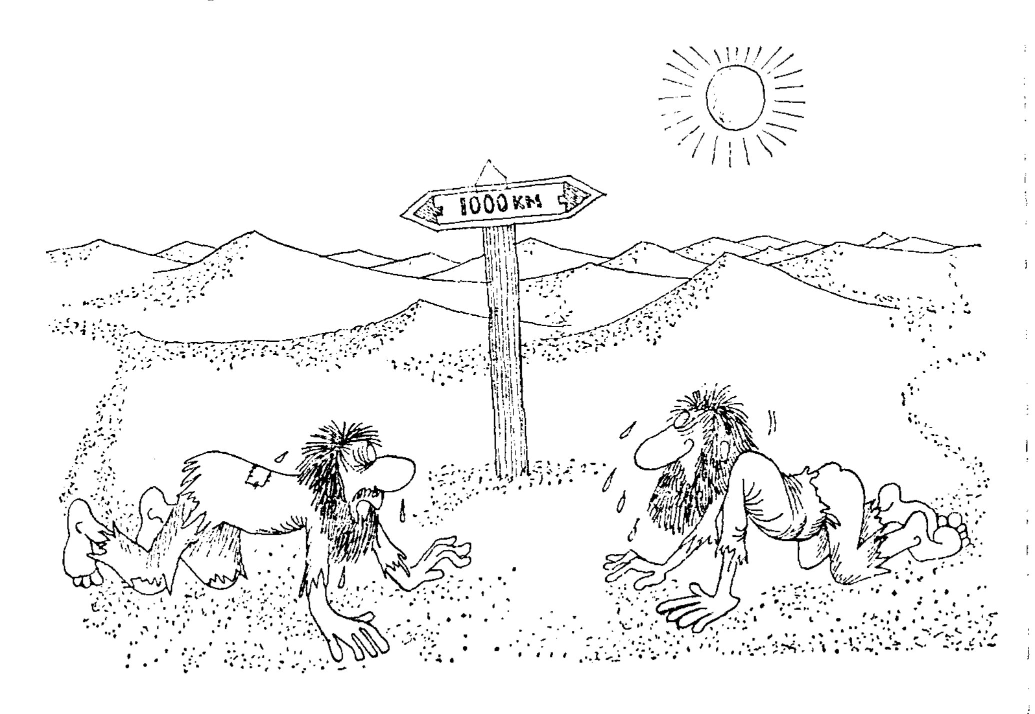
Но ученых не устраивает роль наблюдателей тех чудес, что преподносит иногда природа, когда они вводят в строй очередной сверхмощный ускоритель. Физики сами хотят предсказывать эти чудеса. А вот орудия предсказания — теории — они не имеют.

Получается противоречие. С одной стороны, теории не создать до тех пор, пока не будет решен вопрос о

внутренней структуре адронов и не будут выявлены особые закономерности процессов множественного рождения частиц, а с другой — невозможно, не имея теории, разобраться в закономерностях взаимодействия двух нуклонов больших энергий.

Так или иначе, но проблема множественного образования адронов в процессах сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий занимает сегодня центральное место в физике высоких энергий.

Несмотря на то, что интенсивное теоретическое и



экспериментальное изучение этого вопроса началось сравнительно недавно, развитие этой перспективнейшей области физики уже вызвало к жизни новые фундаментальные понятия, оригинальные подходы, смелые гипотезы.

Тринадцать лет назад академик М. Марков обратил внимание на то, что при глубоко неупругом рассеянии электронов и нейтрино на протонах, то есть в электромагнитных и слабых взаимодействиях при больших энергиях, протон должен вести себя как точечный объект.

Через 6 лет американский теоретик Дж. Бьёркен высказал предположение, что вероятность глубоко неупругого рассеяния электронов должна обладать свойством масштабной инвариантности, то есть зависеть не от

размера протона и массы сталкивающихся частиц, а только от соотношения их импульсов.

Эксперименты, поставленные на Стенфордском электронном ускорителе в 1969 году, подтвердили это предположение. Неожиданная особенность взаимодействия частиц больших энергий и навела Р. Фейнмана на мысль о точечной структуре нуклонов. В предложенной им модели адроны содержат бесконечное множество элементов с исчезающе малыми размерами, которые получили название партонов.

Гипотеза о партонах бурно обсуждается в настоящее время. Правда, как заметил А. Балдин, вместо формул пока обычно рисуют картины, напоминающие абстрактную живопись. И зачастую автор очередной картинки, пожалуй, сам не вполне понимает, что он рисует, а слушатели делают вид, что понимают. В этом нет ничего странного. На переднем фронте науки о микромире, где знание борется с абсолютным незнанием, истина выкристаллизовывается далеко не сразу.

Сейчас твердо можно сказать, что нуклоны состоят из каких-то более элементарных сущностей. Вся проблема в том, как описать эту реально существующую сложную структуру адронов. Не исключено, что это удастся сделать на основе кварковой модели. Но существует и другой подход к этой проблеме.

Группа сотрудников Лаборатории теоретической физики ОИЯИ под руководством профессора А. Тавхелидзе, опираясь на представление о нуклоне как о куске особой адронной материи, сумела доказать, что масштабная инвариантность, обнаруженная первоначально в электромагнитном взаимодействии электрона с протоном, должна также проявиться в глубоко неупругих процессах, при сильных и слабых взаимодействиях между частицами.

Масштабная инвариантность обусловлена внутренней структурой элементарных частиц и является важнейшим проявлением свойств адронной материи.

«Безразмерность» тех внутренних сущностей, которые принимают на себя энергию при глубоко неупругих процессах, допускает толкование ядерных реакций и в рамках партонной модели, и в том случае, когда протон представляется как сплошной протяженный объект.

Природа сжалилась над физиками и упростила за-

кономерности взаимодействий ядерных частиц при больших энергиях. В самом деле, эксперименты, проведенные на ускорителе в ЦЕРНе, в Серпухове, и затем в Батавии (США), выявили замечательное общее свойство, присущее всем процессам множественного рождения частиц. Сложные математические формулы, с помощью которых физики ухитрялись как-то описывать те или иные реакции между протонами меньших энергий, оказались вдруг совершенно ненужными. В новой области энергий результат столкновения двух частиц зависел только от соотношения импульсов налетающей и рожденной частицы.

Неожиданно выявленное экспериментаторами единообразие многих процессов, происходящих в момент катастрофического столкновения двух частиц в широком интервале энергий от 10 до 400 миллиардов электрон-вольт, напоминает путешествие в пустыне, где нет никаких ориентиров. Все равно, едете вы на верблюде или мчитесь на машине, информация исчерпывается только числом дней и длиной пройденного пути. И впечатления совершенно не зависят от того, какими вы представляете себе окружающие барханы: монолитными или состоящими из мириадов песчинок.

Масштабная инвариантность обнаружена в той области энергий взаимодействующих частиц, в которой отношение квадратов импульсов частиц намного больше квадратов масс. В той же области энергий изучает взаимодействия ядер и релятивистская ядерная физика.

Постановка задачи о применении масштабной инвариантности к столкновениям релятивистских ядер и первые эксперименты в этой области были предложены и выполнены в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Оказалось, что новая закономерность, свойственная адронной материи при высоких энергиях, применима и к релятивистским ядрам. Исследование же столкновений релятивистских ядер, в свою очередь, поможет лучше разобраться в специфике процессов множественного рождения частиц.

В столкновениях двух нуклонов рождаются десятки новых частиц. Тем же заканчивается и соударение релятивистских ядер. Но между этими похожими событиями микромира есть принципиальная разница, которой и воспользовались физики для выяснения деталей взаимодействия элементарных частиц.

Структура двух ядерных участников реакции известна, чего нельзя сказать о нуклонах. Когда будут ускоряться ядра разных химических элементов, появится возможность в широких пределах варьировать квантовые свойства сталкивающихся объектов и сравнивать особенности соударения легких и тяжелых ядер. При этом, может быть, удастся подобрать наиболее удачный макет и для элементарной частицы.

— Можно согласиться с тем, что ядро со своими нуклонами действительно похоже на составную элементарную частицу. Но подделаться под частицу — кусочек сплошной адронной материи — оно, наверное, не в состоянии?

— Почему? При очень высоких энергиях, когда вероятность процессов не зависит ни от размеров внутренних сущностей взаимодействующих объектов, ни от их массы, вполне уместно предположить, что ядро — архипелаг крупных островков из сплошной адронной материи.

— Предполагать можно все, что угодно. Но предпочтительнее, как говорил один литературный герой, наука не умственная, а натуральная.

— Вот это верно!

Недавно экспериментаторы получили подтверждение правильности нового представления о ядре. Ученые Дубны обнаружили новое физическое явление: ядерный кумулятивный эффект. Открыт он был в 1971 году вскоре после того, как впервые в мире синхрофазотрон Лаборатории высоких энергий стал ускорять ядра дейтерия (их называют дейтонами) до энергии 11 миллиард-электрон-вольт.

При столкновении дейтона с протоном рождается более легкая частица — пи-мезон. Суть кумулятивного поведения ядерного вещества в этой реакции заключается в том, что пи-мезон приобретает сразу суммарную энергию протона и нейтрона. Два нуклона, из которых состоит ядро дейтерия, ведут себя как одна частица.

Этот результат был не просто новым или неожиданным, он заставлял совершенно отказаться от тех воззрений, что сложились у физиков за долгие годы работы с нерелятивистскими дейтонами.

Ядро тяжелого изотопа водорода было «притчей во языцех» всякий раз, когда разговор шел о самой рыхлой, наименее всего связанной системе нуклонов. Но как

только к концу 1970 года четко подтвердились масштабно инвариантные свойства не только электромагнитных, но и сильных взаимодействий, А. Балдин предложил с этих новых позиций взглянуть на поведение сверхбыстрого дейтона.

Ученый утверждал, что энергия частиц, рождающихся в соударениях дейтонов и более тяжелых ядер, разогнанных до таких скоростей, при которых действует недавно открытая закономерность микромира, зависит от свойств непосредственно взаимодействующих участков адронного вещества.



Какое же из возможных толкований внутренней структуры адронов, согласующееся с принципом масштабной инвариантности, подходило для описания явлений в релятивистской ядерной физике?

По партонной модели нуклон ведет себя как совокупность точечных частиц — партонов, каждая из которых совершенно независимо от других сталкивается с партонами мишени. И релятивистское ядро вполне можно было воображать наполненным партонным газом. Такая модель (модель Р. Фейнмана) в приложении к сложным нуклонным системам позволяла при расчетах опираться на принцип масштабной инвариантности.

Но вопрос о том, какую максимальную энергию передаст ядро рождающейся в реакции частице, оставался открытым. Что-то определенное на этот счет удалось бы узнать в том случае, если бы стало известно, с какой вероятностью бóльшая часть внутренней энергии ядра сосредоточится у одного партона из числа тех, что взаимодействуют с мишенью. А вот этой-то величины из партонной модели элементарных частиц и нельзя было извлечь.

Гораздо плодотворнее оказалось применение развитого теоретиками Дубны подхода к адронному веществу как к однородной, сплошной среде.

Но во всех без исключения моделях атомных ядер никогда не учитывалась протяженность нуклонов в пространстве: их попросту считали точечными. И несмотря на то, что расстояния между протонами и нейтронами были сравнимы с размерами самих частиц, столь грубое упрощение не мешало успеху образных представлений о ядрах.

«Шила в мешке не утаишь», — говорит пословица. И релятивистским ядрам уже не утаить того, что они, по сути дела, состоят из сверхплотных сгущений нуклонов-кластеров, которые ведут себя подобно островкам сплошной адронной материи. Столкновение быстрого ядра с протоном выглядит как соударение с ним одного из таких островков, для которого, как и для элементарной частицы, должно выполняться соотношение масштабной инвариантности.

Из гипотезы А. Балдина следует, что пи-мезон, рожденный при взаимодействии протона с протонами ядер мишени, наследует энергию всех частиц той группы нуклонов, к которой принадлежал непосредственный участник этой реакции. Предсказание теории было четким. Экспериментаторы могли обнаружить вторичные частицы с энергией, намного превышающей ту, что им полагалось иметь в соответствии с обычными законами кинематики.

Превращение синхрофазотрона ОИЯИ в ускоритель релятивистских ядер давало возможность проверить идею о кумулировании энергии нескольких ядерных частиц на одной при взаимодействии быстрых дейтонов с протонами.

Многим физикам предположение о кумулятивном эффекте казалось неправдоподобным. Они считали, что дейтон из-за своей рыхлости не может действовать как

монолитное зерно адронной материи. «Почему при столкновении, например, двух камней не рождаются элементарные частицы больших энергий?» — в такой форме выражалась крайняя степень недоверия к новой точке зрения.

Но этот вопрос не был криминальным для гипотезы кумулятивного эффекта. Никак нельзя было ожидать, что все нуклоны ядер сталкивающихся камней большую часть энергии передадут одной рождающейся частице. Сила удара между любыми макроскопическими телами (камнями) слишком мала, и ядра этих объектов даже не соприкасаются; дело ограничивается соударением между электронными оболочками атомов.

В 1971 году группа физиков-экспериментаторов Лаборатории высоких энергий ОИЯИ под руководством доктора физико-математических наук В. Ставинского обнаружила кумулятивный эффект в реакции с ускоренными ядрами тяжелого изотопа водорода — дейтерия. Пионерские результаты, полученные дубненскими учеными, подтвердили применимость масштабной инвариантности к составным нуклонным системам и правильность теоретических представлений о ядре как о группе микроостровков сплошной адронной материи.

Пи-мезоны, возникающие при взаимодействии релятивистских дейтонов с протонами, получали до 98 процентов всей энергии ускоренных ядер. Но ядра дейтерия — простейшие образования. И физикам необходимо было выяснить, как поведут себя более сложные ядерные системы. А где было взять релятивистские тяжелые ядра, если ускоритель выдавал только дейтоны? Безвыходное положение?

Ничего подобного. Ученые недолго предавались унынию. Совершенно строго, с точки зрения законов механики, и остроумно с самой общей точки зрения, они рассудили, что, если нет возможности бросать релятивистские ядра на протоны, то надо бросать протоны большой энергии на покоящиеся тяжелые ядра мишени. И если регистрировать пи-мезоны, вылетающие под углом 180 градусов к пучку ускоренных протонов, то есть в направлении «назад», то реакция представляется обратной; быстрое ядро налетает на протон; и если кумулятивный эффект существует, то его можно обнаружить, измеряя энергию пи-мезонов.

Именно такой эксперимент и был сделан. Электронная аппаратура зафиксировала, что из ядер углерода, алюминия, меди и свинца вылетали пи-мезоны с энергией до 700 миллионов электрон-вольт. А максимальная энергия, которую пи-мезоны приобретали при обычном столкновении двух протонов, так сказать, один на один, не должна была превышать 244 миллионов электрон-вольт.

Точно такой же результат ученые получили в реакции рождения пи-мезонов с положительным электрическим зарядом и для тяжелых К-мезонов.

Островки адронного вещества в ядрах проявлялись с той вероятностью, которая была предсказана теорией. Судя по энергии вторичных частиц, в столкновении подчас одновременно участвовало до четырех ядерных нуклонов.

Отмечая значительный вклад, который внесли в работу VI Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра ученые Советского Союза и стран народной демократии, известный американский физик профессор Г. Андерсен сказал: «Многие научные новости на конференции носят восточный акцент».

К этим новостям, несомненно, относились дубненские результаты, полученные в области релятивистской ядерной физики: направления, связанного с принципиально новыми аспектами взаимодействия в ядерном веществе. Наиболее интересные обсуждения завязались как раз вокруг кумулятивного эффекта.

Еще не так давно некоторые недальновидные специалисты говорили, что эра волнующих событий в ядерной физике кончилась и осталась лишь прозаическая задача выяснения деталей. Но атомные ядра продолжают преподносить все новые и новые сюрпризы. Один из таких сюрпризов — кумулятивный эффект; он еще ждет своего более глубокого осмысливания. Особое значение эта проблема приобретает в связи с идеей о кварковой структуре ядерного вещества.

Дейтон — слабо связанная система из двух частиц — при релятивистской скорости превращался в компактное плотное ядро. И только в том случае, когда его два нуклона в ядерной реакции действовали заодно, вылетающие пи-мезоны и получали максимальную энергию. Но каждый нуклон по кварковой модели состоит из трех кварков. Если дейтону с большой энергией удается так сильно «сплотить» свои частицы,

то, возможно, в каких-то других реакциях при высоких энергиях он (дейтон) проявит свою кварковую структуру и будет вести себя уже не как двухнуклонный, а как шестикварковый объект.

Дубненские физики готовят сейчас опыты по рассеянию релятивистских дейтонов и ядер гелия для проверки этого предположения. С той же целью американские ученые изучали рассеяние электронов самых больших энергий на ядрах дейтерия. Из результатов эксперимента следует, что в этой реакции дейтон действительно выглядит как шестикварковая частица.

— Создается впечатление, что по мере усиления натиска на атомное ядро оно, подобно хамелеону в момент опасности, меняет свой «облик». Но когда «опасность» минует, ядро опять становится самим собой или нет?

— Смотря, что вы имеете в виду, говоря «меняет свой облик»! В результате реакции ядро может потерять один или несколько нуклонов, разлететься на несколько частей; наконец, перейти в возбужденное состояние. Однако во всех этих случаях главное качество ядерного вещества — его плотность — не меняется.

— Неужели она не поддается никаким внешним воздействиям?

— Категорически утверждать этого нельзя. Как графит при большом давлении превращается в алмаз, так и ядерное вещество, может быть, удастся спрессовать и перевести в сверхплотное устойчивое состояние.

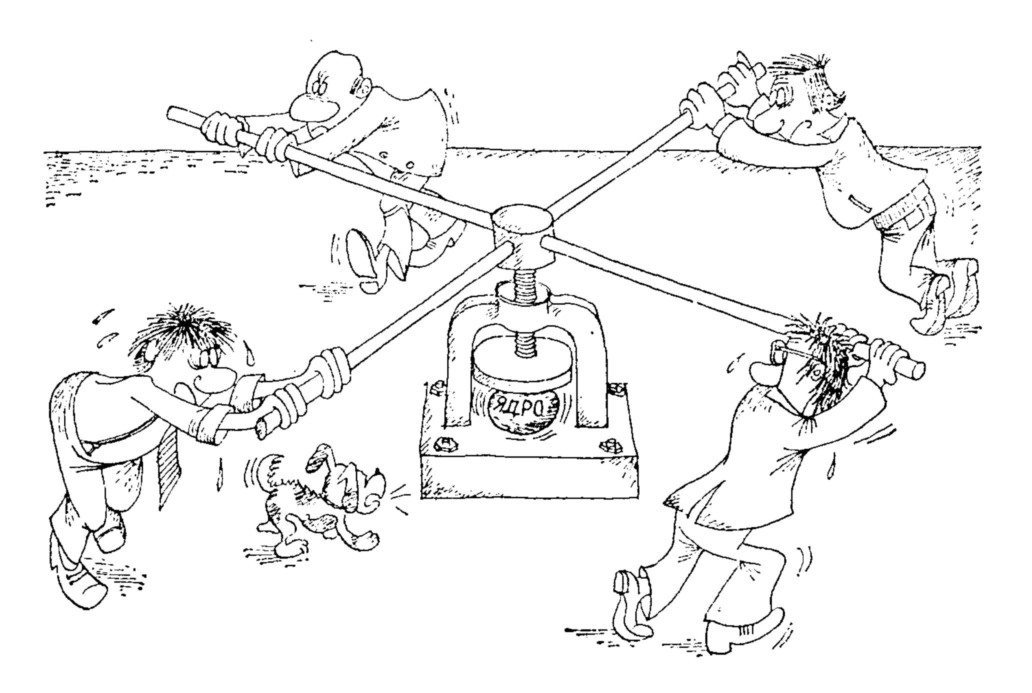
Советский теоретик А. Мигдал предложил одну из самых интригующих современных гипотез о строении ядра, в которой он замахивается как раз на то единственное свойство ядерной материи, которому до сих пор удавалось оставаться неизменным.

При анализе процесса рождения и конденсации электрон-позитронных пар вблизи гипотетических ядер с большим электрическим зарядом у него возникла интересная идея: нельзя ли найти в природе такой источник мезонного поля, в присутствии которого происходило бы интенсивное рождение пи-мезонов? Естественно, что необходимое поле могло возникать только где-то среди большого коллектива связанных нуклонов.

Обдумывание этой задачи привело А. Мигдала к важному выводу: рождение и конденсация пи-мезонов, то есть возникновение так называемого «пи-мезонного

конденсата», могло происходить лишь в системе протонов и нейтронов, механические моменты которых ориентированы определенным образом.

К сожалению, современная теория ядерного вещества не позволяет достаточно точно предсказать, при какой именно плотности нуклонов начнут «выделяться» избыточные пи-мезоны. Можно только сказать, что она не должна сильно отличаться от плотности обычных ядер. Если критическая плотность окажется немного меньше ядерной, то конденсат есть свойство обычных



ядер и пи-мезонный конденсат связан со слоистой ядерной структурой. Но если появление конденсата присуще только более плотным ядерным системам нуклонов, то ясно, что обычные ядра — неподходящая арена для проявления предсказываемого свойства ядерного вещества. В этом случае, настаивает теория А. Мигдала, ядра могут существовать в особых, сверхплотных состояниях.

Получается так, что двум не очень сильно отличающимся значениям критической плотности соответствуют совершенно разные состояния ядерного вещества.

Ядерные частицы, как мы уже знаем, благодаря постоянному движению на мгновения создают в ядре участки более разреженные или более плотные. Но сред-

няя плотность ядерного вещества остается постоянной. Что же надо сделать с ядром, чтобы проверить, может ли оно стать сверхплотным?

Вполне реальную возможность для проверки сжимаемости ядерного вещества подсказала физика элементарных частиц и, в частности, результат исследований реакции множественного рождения. Одновременно возникающие в одной точке пространства нуклоны, гипероны и мезоны узким, слабо расходящимся потоком устремляются вперед, по направлению создавшей их частицы. Эта особенность ядерной катастрофы, как объясняют теоретики, связана с мгновенным зарождением в адронном веществе быстро передвигающегося сгустка — файербола (огненного шара), который на выходе из ядра распадается на множество отдельных частиц. Файербол вызывает ударную волну, на фронте которой и образуются сгущения ядерной материи.

Один быстрый протон с помощью ударной волны заставляет все нуклоны ядра совершать коллективные движения, обладающие очень большой энергией. А «девятый вал», который возникает при столкновении двух релятивистских ядер, может так повысить плотность нуклонов, что ядро перейдет в новое квантовое состояние — сверхплотное.

Будет ли ядро в этом новом состоянии устойчивым или, наоборот, неустойчивым — неизвестно. В обычных ядрах постоянная плотность поддерживается равновесием между силами притяжения и сменяющими их на малых расстояниях между нуклонами столь же мощными силами отталкивания. Но, может быть, при еще большем сближении ядерных частиц они опять начнут притягиваться друг к другу? Тогда естественно предположить, что на этих сверхблизких расстояниях ядерное вещество «схлопывается» в более компактную, более крепко связанную систему нуклонов.

Образование стабильного ядра с повышенной плотностью должно сопровождаться выделением энергии, в десятки раз большей, чем, например, в реакции деления ядра урана. Поэтому открытие сверхплотного состояния ядерного вещества и возможности искусственного получения сверхплотных стабильных ядер произвели бы настоящий переворот в ядерной энергетике.

Первая статья А. Мигдала с подробным изложением основ новой гипотезы о структуре ядра была опубликована в 1971 году, но осталась как-то не замеченной экспериментаторами. Требовался некоторый срок для преодоления «здорового консерватизма» физиков.

На Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра в Санта-Фе доклад о последних результатах, полученных группой сотрудников Института теоретической физики АН СССР под руководством А. Мигдала, был прослушан с большим интересом. Внимание к этой оригинальной и достаточно глубоко разработанной идее о сверхплотных ядрах в последнее время подогревается быстрым развитием релятивистской ядерной физики. Появилась надежда, что с помощью ускоренных сложных ядер удастся получить сверхсжатое ядерное вещество.

Недавно в Беркли (США) были проведены первые эксперименты по обнаружению ударных волн во взаимодействиях релятивистских ядер. Однако американским физикам не удалось сделать определенного вывода. Более удачной, по-видимому, оказалась попытка ученых из ФРГ. Исследуя параметры треков вторичных частиц в фотоэмульсиях, которые подвергались облучению потоком релятивистских ядер гелия на синхрофазотроне Дубны, немецкие физики пришли к более определенному заключению: соударение релятивистских ядер рождает ударную волну, которая со скоростью, всего в три раза меньшей скорости света, прокатывается по ядерному веществу.

Физики-экспериментаторы из Калифорнийского технологического института воспользовались тем обстоятельством, что на ускорителе Бевалаке можно было получить ядра аргона с релятивистскими скоростями, и попробовали с их помощью создать сверхплотные ядра. Идея эксперимента заключалась в следующем. Налетающее ядро аргона могло, грубо говоря, проделать отверстие в тяжелом ядре мишени, состоящей из химического элемента свинца. Выбитая колонка (цилиндрик) из спрессованных нуклонов, объединившись с ядром аргона, могла образовать сверхплотное ядро с зарядом, бо́льшим, чем у ядра аргона.

Американские ученые не обнаружили в этой реакции вторичных быстрых ядер с большим зарядом. Однако отрицательный результат никого не обескуражил — ни теоретиков, ни самих экспериментаторов. Он

мог быть связан просто с недостаточно большой энергией ядер аргона либо с необходимостью использовать более тяжелые релятивистские ядра. Возможно, сверхплотные ядра удастся получить только на специальных релятивистских ускорителях атомных ядер, которых еще нет ни в одной лаборатории мира, но которые уже получили свое название — «нуклотрон».

— А не заглянуть ли ядерщикам в космос, подобно физикам-элементарщикам? Вдруг они найдут сверхплотные ядра на Солнце или в какой-нибудь галактике?

— Да, ученые размышляют о том, где можно найти сверхплотные ядра. Но пока межгалактические трассы еще не открыты; релятивистская ядерная физика помогает человеку осваивать ближайшее к Земле космическое пространство.

Ученые еще мало знают, какой конкретно была далекая юность вселенной, да и то, что о ней известно, в основном результат математических расчетов, экстраполяций назад во времени, в прошлое. Тем легче к этому не совсем ясному прошлому относить появление всего того, чему пока нет четких объяснений.

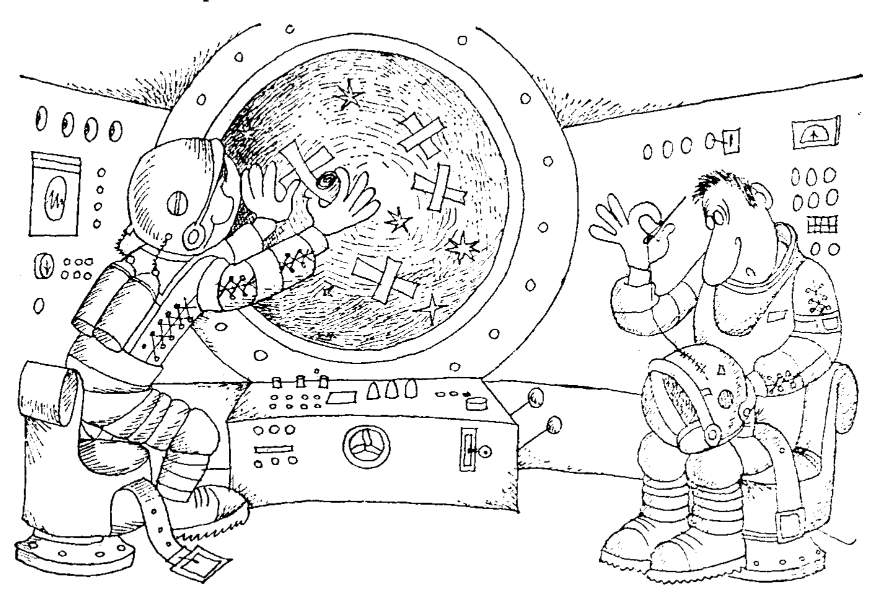
Этому периоду приписывалось рождение античастиц, таинственных кварков, монополей Дирака. И совершенно естественно было предположить, что если в природе существуют сверхплотные ядра, то они, конечно же, возникали в этой начальной стадии развития вселенной, когда ее вещество было еще сверхгорячим и сверхплотным.

Английский теоретик А. Бодмер называет очень плотные ядра коллапсированными. Коллапсированные ядра — это ядра, в которых частицам удалось преодолеть силы отталкивания и «схлопнуться» в комок размером, приблизительно равным радиусу действия ядерных сил.

Дальнейшая судьба сверхплотных ядер древнейшего происхождения могла быть различной. По гипотезе английского физика, они конденсировались на себе подобных и образовали очень компактные массивные черные дыры или рассеивались в межзвездном пространстве. И наконец, они могли находиться в сообществе с обычной материей. В этом случае при образовании планет и звезд они, как более плотные частицы вещества, попадали в центральную часть массивных тел.

А. Бодмер предполагает, что, если сердцевины звезд и планет содержат значительное количество сверхплотных ядер, то реакция захвата ими обычных ядер может быть дополнительным источником тепла космических объектов.

Оригинальная возможность отопления за счет «съедания» собственных ядер! Не исключено, что генерация гигантской энергии в квазарах и центрах галактик не обходится без эффекта коллапсирования атомных ядер!



Сверхплотные ядра могли сохраниться и в остатках протозвездной материи, которая, как предполагает академик В. Амбарцумян, и сейчас существует в глубинах космоса.

Исследования реакций столкновения частиц с тяжелыми релятивистскими ядрами или самих ядер, возможно, покажут, насколько обоснованы предлагаемые теоретиками гипотезы о коллапсе атомных ядер.

В лобовых столкновениях ядер урана с энергией до 2,5 тысячи миллиардов электрон-вольт ударная волна, по расчетам, сожмет ядерное вещество до плотности, в 100 раз больше нормальной. В таком сгустке сильно нагретого ядерного вещества образуются десятки мезонов, много гиперонов — возникает нечто похожее на протозвездную материю.

Если эта воображаемая ядерная реакция когда-нибудь осуществится в лаборатории, то физика дозвездного состояния вселенной превратится в экспериментальную науку.

Сейчас невозможно говорить о том, когда экспериментаторы будут в состоянии проверить космологический аспект проблемы, связанной с таким необычным состоянием вещества, как сверхплотное. Но уже сегодня релятивистская ядерная физика помогает решению некоторых вопросов, возникающих при исследовании галактического космического излучения.

Поиски сверхтяжелых ядер в космических лучах до сих пор не увенчались успехом. И физики пока не дали удовлетворительного объяснения этому явлению.

Взрывающиеся сверхновые как будто время от времени снабжают межзвездный газ ядрами тяжелых элементов. По современным представлениям о нуклеосинтезе на поверхность Земли должны попадать из космоса сверхтяжелые галактические путешественники. Ядерная астрономия, то есть изучение космоса по регистрации потоков сложных ядер больших энергий, могла бы дать свой серьезный вклад в решение астрофизических проблем, но пока не удается установить контакт даже с нашей родной Галактикой на этом языке. Почему?

Пока не совсем ясно, что происходит с ядрами космического излучения от рождения до того момента, когда они достигают поверхности Земли. Межзвездный газ и пыль очень разрежены. Космическое пространство практически пустое. Однако потоки элементарных частиц и ядер — посланцы далеких звезд — преодолевают столь гигантские расстояния, что даже редкие встречи с космическими пылинками сильно изменяют их первоначальную энергию и массу. По дороге к Земле тяжелые ядра «теряют в весе» за счет реакции распада на легкие осколки при столкновении с другими ядрами. После подобных «дорожных происшествий» поток космических лучей постепенно обогащается изотопами легких химических элементов, и ученые могут только строить разные предположения об исходном составе ядер галактического излучения.

Релятивистская ядерная физика позволяет моделировать процессы столкновения тяжелых ядер больших энергий внеземного происхождения. Измеряя вероятность разбивания ядер на осколки и изучая распределение энергии между ними, ученые, возможно, сумеют намного точнее воссоздать условия рождения и ускорения тяжелых и сверхтяжелых ядер в Галактике.

Пока человек не шагнул в космические просторы, зарождающиеся там потоки элементарных частиц и ядер были интересны лишь с точки зрения решения научных вопросов, не имеющих отношения к биологии или медицине. Теперь возник совершенно новый аспект старой проблемы космического излучения. Как оно действует на человека, не защищенного толстым слоем земной атмосферы? Какую радиационную опасность несут быстрые ядра тяжелых элементов?

Хорошо известно, что тяжелые многозарядные частицы отличаются от всех других ионизирующих излучений бо́льшей плотностью разрушений, которые они производят на своем пути. Много ли таких частиц в открытом космосе?

Первые эксперименты с целью проверки степени угрозы радиационного поражения, которую таит в себе космическое пространство, были выполнены в 50-х годах с помощью аэростатов, поднятых на высоту 25 километров. В аппаратах находились черные мыши. Известно, что пигментация каждого волоска обеспечивается всего несколькими особыми клетками, весьма чувствительными к действию ионизирующих излучений. Поражение этих клеток ведет к обесцвечиванию волоска, поседению, что очень легко заметить. На спину каждому животному прикрепили стопки ядерных эмульсий. По возвращении на Землю эмульсии проявили и просмотрели под микроскопом. Затем ученые сопоставили следы, оставленные в эмульсии космическими частицами с участками поседения волосков. Результаты этих экспериментов и опыты с животными на ускорителях подтвердили, что быстрые ядра из потока галактических частиц приводят к гибели пигментирующих клеток. Причем для этого достаточно попадания лишь одного тяжелого иона.

Во время серии космических полетов на кораблях «Аполлон» радиобиологи обнаружили сильное влияние релятивистских космических ядер на споры бактерий, семена растений, корешки, проростки и на яйца ракообразных.

Наиболее интересным было открытие американски-

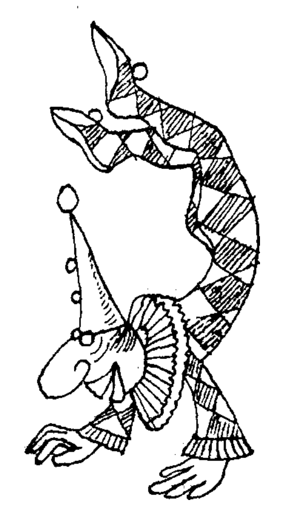
ми астронавтами так называемого явления фосфенов. Участники космического полета периодически ощущали световые «вспышки» при адаптации глаз к темноте. Это наблюдение, сделанное за пределами Земли, было проверено в лаборатории на бэватроне (США) с помощью искусственно ускоренных тяжелых ядер азота. Фосфены возникали в момент разрушения сильноионизирующими частицами светочувствительных элементов сетчатки глаза.

По-видимому, сверхбыстрые тяжелые ядра космического излучения наибольшую опасность представляют для клеток нервной ткани, не обладающих способностью к восстановлению. В шлемах американских космонавтов, находившихся на борту космических кораблей «Аполлон», были обнаружены следы частиц, пробивших их насквозь.

Исходя из количества обнаруженных следов, ученые ориентировочно подсчитали, что при космическом полете продолжительностью в один год может погибнуть приблизительно один процент нейронов в головном мозге человека.

Эксперименты с искусственно полученными релятивистскими ядрами помогут точно определить степень их опасности для организма человека и разработать способы надежной защиты.

„ЧИСТОЕ„ ТЕПЛО ЯДЕРНЫХ ГЛУБИН







— Конечно, освоение космического пространства очень важная задача. Но ядерная физика, наверное, еще не все возможное сделала на Земле?

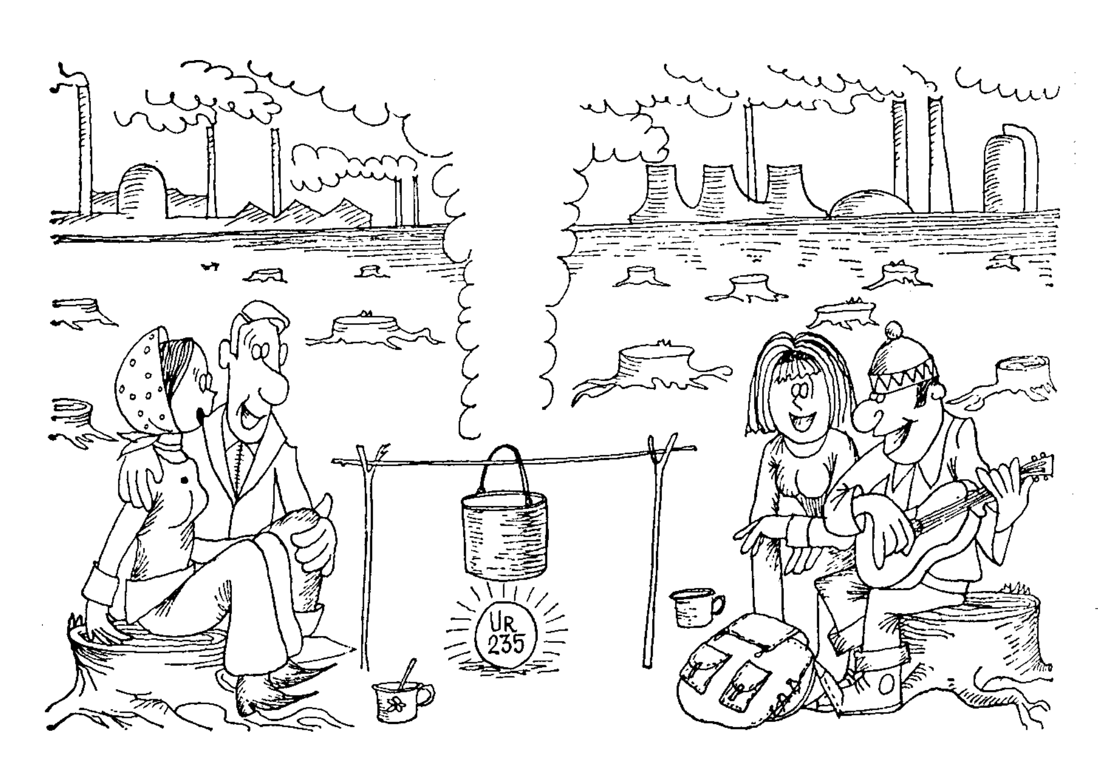
— Вы правы. Еще не полностью решена главная для человечества проблема. Проблема обеспечения будущих поколений практически неисчерпаемыми источниками энергии. И медлить здесь нельзя.

— Вы имеете в виду энергетический кризис?

— Не столько энергетический, сколько экологический!

Современная цивилизация создала нам хорошие условия жизни, но, к сожалению, одновременно привила людям безответственное отношение к природе, последствия которого мы начинаем ощущать. Ядерная физика уже предложила экологически более чистый источник энергии, чем реакция химического окисления. Это поможет снизить скорость загрязнения биосферы Земли.

Раньше человечество получало энергию, не заботясь о том, как тот или иной способ ее добывания отражает-



ся на окружающей природе. Развивающийся капитализм требовал все больше и больше энергии и использовал для этого то сырье, что было под руками. А под руками были каменный уголь, нефть и газ.

То же самое ценное органическое сырье снабжает энергией и нас, поколение людей конца XX века. Только теперь во много раз возросло абсолютное количество потребляемой энергии, а следовательно, и темпы сжигания горючих материалов.

Поэт А. Блок писал в начале нашего века: «...мир зеленый и цветущий, а на лоне его — пузатые пауки — города, сосущие окружающую растительность, испускающие гул, чад и зловоние».

Острое чувство неблагополучия, которое владело поэтом, глубокая озабоченность отдельных ученых за будущее цивилизации говорили о том, что человечество глазами наиболее прозорливых не в один день, не вдруг увидело, что мало-помалу «природа превращается в окружающую среду».

Век XIX передал в наследство XX еще «цветущий и зеленый» мир. Что же оставит после себя век XX?

Современный поэт Л. Мартынов беспокоится уже о том,

Чтобы однажды Земля не спеклась
во единый потухший вулкан,
Не извергающий даже и лаву, —

и надеется, что будущее поколение

...Вновь возвратит воды — рекам,
цветенье — цветам,
небеса — облакам...

Научно-техническая революция, победно шествующая по развитым странам мира, привела в движение столь огромные производительные силы, что человек обрел ничем не ограниченную власть над природой. За короткий промежуток времени он превратился из «царя природы» в ее разрушителя и раба своих потребностей.

Добывание энергии во все больших масштабах — один из серьезнейших факторов, работающих против человека. Если в начале века речь могла идти только о возникновении локальных экологических (экология — наука о взаимодействии организма с окружающей средой) кризисов, то сегодня серьезные опасения внушают взаимоотношения человеческого общества с природой в целом (то есть возможность наступления глобального экологического кризиса).

При сжигании в топках тепловых электростанций угля, нефти или газа в атмосфере непрерывно увеличивается концентрация окиси углерода. Земля, получая свою долю световой энергии от Солнца, рассеивает в пространство некоторую ее часть в виде инфракрасного излучения. Загрязненная атмосфера гораздо хуже пропускает потоки инфракрасных фотонов. Она, как подушка, прикрывает нашу планету и способствует ее перегреву. Возникает так называемый парниковый, или оранжерейный, эффект.

Член-корреспондент АН СССР М. Будыко показал, что произойдет, если средняя температура на Земле повысится хотя бы на один градус или даже на полградуса. Столь небольшое, но повсеместное подрастание температуры может привести к уменьшению ее градиента между экваториальными и полярными областями. Это выравнивание сразу вызовет ослабление скорости циркуляции воздушных масс между экваториальными и полярными широтами. Резко снизится количество осадков в средних широтах и ускорится рост пустынь. И все эти изменения могут произойти за весьма короткий срок, равный длительности жизни одного поколения.

Конечно, это предположение, но оно достаточно обоснованно и вполне может осуществиться, если человечество не примет соответствующих мер.

Одна из них — широкое использование фундаментального открытия физиков: цепной реакции деления ядер урана.

Решительный шаг в этом направлении был сделан в Советской стране, где были разработаны основы мирной ядерной энергетики. Первая в мире атомная электростанция в Обнинске открыла новую эру в энерготехнике. Сейчас ядерная энергетика развивается такими темпами, что, по-видимому, к концу нашего века более 30 процентов всей добываемой в мире электроэнергии будут давать атомные электростанции. Надолго ли хватит ядерного горючего?

Этот вполне резонный вопрос давно волнует и ученых, непосредственно решающих проблемы ядерной энергетики, и тех, кто занимается фундаментальными исследованиями. Несмотря на большие запасы в природе делящихся элементов, в ядерных реакторах используется лишь незначительная их часть. Связано это с

особенностью ядерной реакции деления изотопа урана-235. Только его ядра делятся нейтронами, которые получили название «тепловых», то есть замедленных до тепловых скоростей окружающих молекул.

Изотоп урана-238 для реакции деления требует нейтроны с энергией около одного миллиона электрон-вольт. В реакторе, где в качестве горючего применяется только уран-238, нейтроны, испускаемые делящимися ядрами, тормозятся в веществе до нескольких тысяч электрон-вольт и теряют способность вызвать реакцию деления других ядер урана-238, и цепная реакция глохнет очень быстро.

Итак, необходимого для ядерной энергетики изотопа урана-235 очень мало в природе, его едва хватит до начала следующего века, а урана-238, наоборот, сколько угодно, но он в реакторе не делится. Глубокое изучение свойств атомных ядер помогло найти несколько принципиальных решений проблемы ядерного горючего. Поглощая нейтроны, ядра урана-238 после нескольких радиоактивных распадов превращаются в ядро изотопа плутония-239, который обладает теми же делящимися свойствами, что и уран-235. Но где взять столько нейтронов, чтобы наработать необходимое количество ядерного топлива?

Прежде всего не стоит терять те нейтроны, что рождаются в реакторе при делении ядер урана-235. Уже созданы первые установки, так называемые реакторы на быстрых нейтронах, которые выполняют сразу две функции: вырабатывают энергию и превращают «негорючий» уран-238 в полноценное ядерное топливо. Благодаря особой конструкции этих реакторов та часть нейтронов, возникающих в момент деления ядер урана-235, которая не принимает участия в цепных реакциях, улавливается ураном-238.

Но проблема в целом еще не решена. Потребуется немало усилий ученых и конструкторов, чтобы скорость выработки ядерного горючего соответствовала бы скорости развития энергетики.

Со своей стороны физики, занятые исследованиями фундаментальных свойств атомных ядер, предлагают новые способы получения «горючих» ядерных материалов. Один из них — электроядерный. Он предполагает соединение ускорителя протонов с ядерным реактором в единую систему. В ней уран-238 превращается в плу-

тоний-239, который при делении в реакторе и отдает энергию.

В последнее время ученые рассматривают еще одну принципиальную возможность переделки урана-238 в изотоп, пригодный для ядерной энергетики, с помощью... ускорителя нейтронов.

Способа ускорения нейтральных частиц как будто не существует. Все современные синхрофазотроны, циклотроны, синхроциклотроны ускоряют заряженные, и только заряженные, частицы. И в самом маленьком и в самом большом из этих устройств частицы подхлестываются электрическим полем. А чем можно подтолкнуть нейтрон?

Идею ускорения нейтронов предложил в 1959 году советский ученый Ю. Петров. Конечно, эту гипотезу нельзя проверить ни на одном из известных типов ускорительных устройств. Дополнительные порции энергии нейтрон должен получать от... ядер, находящихся в возбужденном состоянии, то есть имеющих избыточную энергию.

Представим себе, что удалось создать особую среду, значительная доля ядер которой находится не в основном состоянии, а в изомерном. Эта среда напоминает рабочее тело гамма-лазера, насыщенное ядрами-изомерами (об этом мы говорили в предыдущей главе). Нейтрон, сталкиваясь с ядром, как бы спускает взведенный ядерный курок. Система связанных нуклонов переходит в основное состояние, а нейтрон забирает ее избыточную энергию.

В этом необычном ускорителе нейтроны, набирающие энергию при хаотических соударениях с возбужденными ядрами, напоминают пчел, суетящихся около цветов в поисках нектара. Далеко не каждый цветок оказывается со сладкой капелькой, и далеко не каждая встреча ядра с нейтроном приводит к возрастанию энергии нейтрона. Ядро может оказаться невозбужденным.

В этом случае нейтрон не только не увеличивает свою энергию, но может потерять накопленную раньше, если масса ядра ненамного превосходит его собственную массу. Изомерное ядро, сбрасывая избыток энергии при столкновении с нейтроном, испытывает отдачу. Более массивные изомерные ядра в нейтронном ускорителе предпочтительнее, поскольку они тратят на отдачу гораздо меньше энергии, чем легкие.

В ускорителе нейтронов не должно быть изомерных ядер, имеющих запасные уровни возбуждения при энергии, равной той, до которой желательно разогнать нейтроны. Иначе вместо ускорения нейтроны сами начнут «накачивать» ядра энергией, переводя их в возбужденные состояния.

Предварительные теоретические оценки показывают, что подходящая изомерная среда может стать ускорителем нейтронов до энергии в один или два миллиона электрон-вольт.

В установке, содержащей уран-238, перемешанный с изомерными ядрами, по-видимому, может возникнуть самоподдерживающаяся реакция деления.

В самом деле, возбужденные ядра, отдавая свою энергию нейтронам, поддерживали бы их в отличной «спортивной» форме, и они постоянно были бы в состоянии преодолеть высокий энергетический барьер деления ядер урана-238.

Ученые пока обсуждают только принципиальные вопросы, связанные с созданием подобного изомерного реактора. Но неожиданная радикальная идея может сразу продвинуть вперед решение этой проблемы. Не так давно группа советских ученых выдвинула предложение, как с помощью светового пучка лазера сжимать делящееся вещество, повышая его плотность в сотни раз. Естественно, что в случае успеха это сразу снизило бы необходимое критическое количество вещества, при котором возникает цепная ядерная реакция деления. Эта идея, возможно, приблизит момент проверки гипотезы об изомерном реакторе. Она поможет обойти главную трудность для его практической реализации — заготовку огромного количества изомерных ядер.

Когда будет создан реактор на сжатом делящемся веществе, можно будет проверить на опыте и принцип действия изомерного реактора, для которого необходимо будет создать всего лишь граммы изомерных ядер.

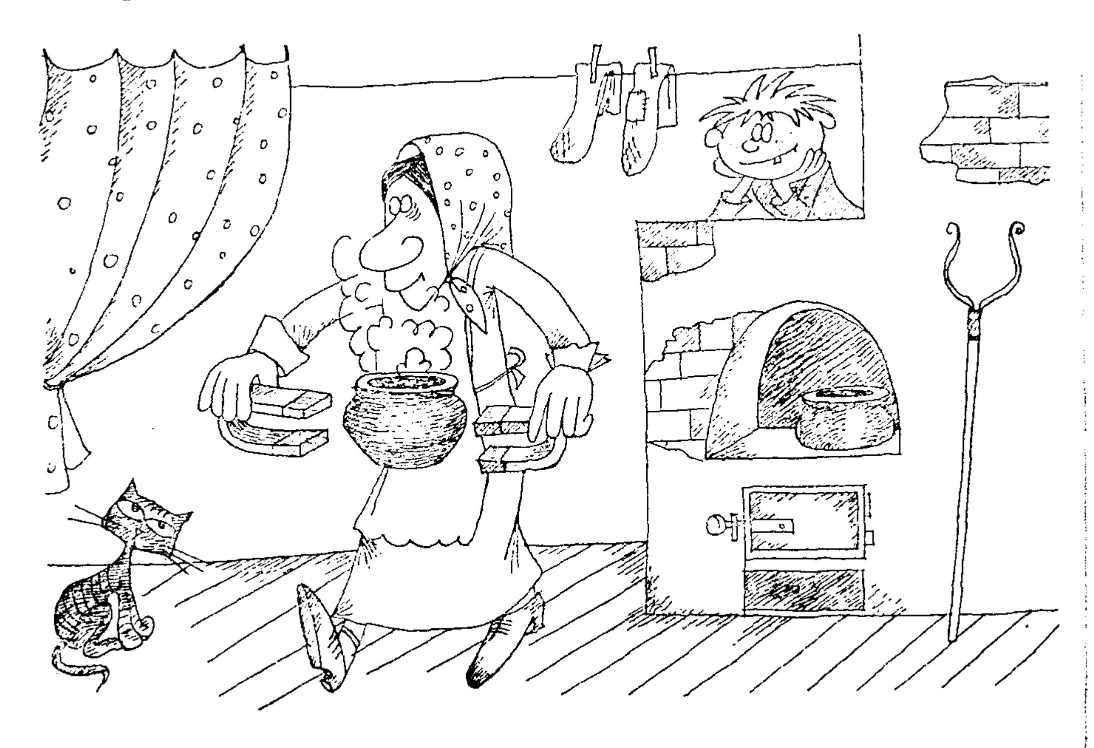
— А что будут делать люди потом, когда исчерпаются запасы тяжелых элементов?

— Имея это в виду, физики давно пытаются осуществить вторую возможность получения ядерной энергии, соединяя два легких ядра.

— «Опыт» Солнца нам здесь не поможет?

В общих чертах ученые знают, как работает солнечная «установка», вырабатывающая энергию, благодаря которой на Земле возникла жизнь и появился человек. Слияние ядер водорода — основная ядерная реакция, протекающая как в далеких звездах, так и в нашем Солнце. Эту звездную реакцию физики впервые воспроизвели в земных условиях еще в 1932 году, сразу после запуска первого ускорителя.

Искусственно ускоренные ядра изотопа водорода — дейтерия, — соударяясь с покоящимися дейтонами (ядрами дейтерия) мишени, превращались в ядра гелия с большим дефектом массы. Каждое такое событие непременно сопровождалось выделением энергии в точном соответствии с формулой А. Эйнштейна $E=mc^2$.



Два ядра дейтерия могут сливаться друг с другом только в том случае, если обладают скоростью, достаточной для преодоления электростатического барьера. Тогда они с разгона «перемахивают» через этот заслон и накрепко сцепляются «баграми» ядерных сил.

Разогнать дейтоны в ускорителе до необходимой энергии и бросить их на мишень несложно. Но соединяются только те частицы, которые испытали лобовое соударение, что случается довольно редко, а остальные, рассеиваясь на холодных атомах мишени, быстро расходуют энергию на их ионизацию и полностью теряют возможность когда-либо подойти близко друг к другу. Мишень просто впитывает в себя энергию падающих на нее горячих дейтонов, возвращая лишь незначительную ее часть в редких реакциях синтеза двух ядер. Такими изредка вспыхивающими спичками не разжечь ядерного «костра» в холодной мишени.

Реакция слияния ядер тяжелых изотопов водорода, так же как и другие отдельные экзотермические ядерные реакции, никогда не принималась всерьез как возможный практический метод генерации энергии. Она не давала выигрыша. Каким же образом в звездах эта реакция синтеза ядер делается энергетически выгодной?

Если четвертое измерение — удобная математическая абстракция, то четвертое состояние вещества — полнейшая реальность. Древние называли его огнем, мы предпочитаем слово «плазма». Плазма — это ионизированный, то есть состоящий из смеси заряженных ядер и электронов, газ.

Почти вся материя вселенной находится именно в этом четвертом состоянии; и Солнце и звезды состоят из раскаленной плазмы. В ней реакции синтеза становятся достаточно интенсивными, потому что уже многие ядра изотопов водорода имеют энергию, достаточную для сцепления.

В хаосе теплового движения ядра непрерывно сталкиваются друг с другом, но энергии уже не теряют. Поэтому даже неудачное, не лобовое столкновение не выводит дейтон из игры. Если каждое ядро успеет испытать несколько десятков соударений, то одно из них наверняка завершится реакцией синтеза. Эти реакции называют термоядерными, потому что они происходят в веществе, нагретом до очень высокой температуры.

Первый экспериментальный термоядерный взрыв, который был осуществлен в 1952 году, доказал возможность освобождения большого количества термоядерной энергии. Но человечество заинтересовано в создании такого устройства, где можно добывать термоядерную энергию не взрывом, а в условиях жесткого контроля над ней.

По аналогии с ядерными реакторами, в которых идут контролируемые человеком реакции деления ядер

урана, будущие установки для интенсивных, но управляемых реакций синтеза легких ядер назвали термоядерными реакторами.

Насколько быстро удалось пройти путь от открытия цепных реакций деления урана до создания первого реактора, настолько более трудной, тернистой и утомительной оказалась дорога, ведущая к созданию термоядерного реактора.

Плазма давно служит человеку. Без нее не обходится ни один газоразрядный прибор. Каждый вечер на улицах вспыхивают лампы дневного света, огни реклам, в которых пылает так называемая холодная плазма с температурой ионов, близкой к комнатной. До какой же температуры надо нагреть дейтериевую плазму, чтобы начались интенсивные реакции синтеза?

Термоядерный «реактор» Солнца работает при температуре около 15 миллионов градусов. Такая температура слишком низка для плазмы будущего энергетически выгодного земного реактора. И вот по какой причине.

Электростатический барьер вокруг заряженного ядра дейтерия имеет высоту около 400—500 килоэлектрон-вольт. А температура в 15 миллионов градусов сообщает ядрам в среднем энергию всего лишь в 2 килоэлектрон-вольта. Большинство ядер без толку топчется друг около друга, и только редкие из них, те, кому перепала большая энергия, вступают в реакцию синтеза. Но солнечный реактор содержит такую огромную массу вещества, что даже при малой вероятности термоядерных реакций в не очень горячей плазме достаточно большое количество ядер участвует в реакции слияния.

В земных условиях осуществить это нельзя. В больших масштабах получать термоядерную энергию с помощью взрыва водородной бомбы можно, но нельзя же использовать взрыв в качестве источника энергии для мирной деятельности! Проблема освоения термоядерной энергии заключается в добывании ее небольшими порциями, пригодными для использования в энергетике и на транспорте.

Значит, при небольшой массе реагирующего вещества вся надежда возлагается только на температуру. Только увеличивая температуру плазмы, можно увеличить и вероятность термоядерных реакций. В разогретой до 100 миллионов градусов плазме ядра в среднем будут иметь энергию около 15 килоэлектрон-вольт, то есть еще во много раз меньше той, что необходима для преодоления силы электростатического отталкивания. И все-таки столь высокая температура обеспечивает возможность вступления в реакцию синтеза уже значительно большему количеству частиц.

Энергия, которую необходимо «накачать» в плазму для разжигания в ней интенсивных термоядерных реакций, относительно невелика. Но как дырявая велосипедная шина быстро теряет воздух, так же быстро теряет получаемую энергию и плазма, касаясь холодных стенок сосуда. Здесь и Прометей опустил бы руки. Ему просто не в чем было бы принести людям огонь из термоядерного костра.

В звездах огромные силы тяготения удерживают горячую плазму в центральной области и не дают ей расползтись и перемешаться с более холодными слоями. На Земле физикам предстояло создать в лаборатории такую звездную плазму и научиться удерживать ее некоторое время в нагретом состоянии.

«Проблема управляемого термоядерного синтеза по своей трудности оставляет позади все другие научно-технические проблемы, порожденные успехами естествознания в XX веке», — говорил академик Л. Арцимович.

Идея о том, что горячую плазму можно «удержать в руках» с помощью магнитного поля, возникла примерно четверть века назад. Плазма получается при достаточно сильном нагревании газа. Уже при температуре в несколько тысяч градусов начинают «рваться» электромагнитные узы, удерживающие электроны вокруг ядер, а при температуре в миллионы градусов практически все атомы распадаются на составные части. Любой, даже очень маленький, кусочек плазмы остается электрически нейтральным, но в ней хаотически движутся не нейтральные атомы, а одинаковое число положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. И те и другие частицы покорны магнитному полю, и поэтому казалось, что с его помощью легко управлять плазмой.

Сначала идея о магнитной термоизоляции плазмы была реализована в обычной разрядной трубке, в том самом приборе, в котором Дж. Дж. Томсон обнаружил

электроны, оторванные от атомов в результате ионизации, и физики впервые в конце прошлого века получили вещество в четвертом состоянии. Через дейтериевый газ, находящийся в трубке, в течение миллионной доли секунды пропускали мощный электрический разряд. Ток, нагревая газ, создавал плазму, а магнитное поле тока отрывало ее от стенок и стягивало к оси трубки. Теперь плазма уже не касалась холодных стенок, и ее удавалось нагреть до миллиона градусов. Так впервые в лаборатории ученые получили вещество при температуре, равной температуре солнечной короны. Происходили при таком нагреве термоядерные реакции синтеза или нет?

Главный признак начала термоядерного слияния ядер — появление нейтронов. И при образовании ядер гелия из двух слипшихся дейтонов, и в реакции синтеза дейтона с ядром самого тяжелого изотопа водорода — трития обязательно рождаются нейтроны. Появления в горячей плазме этих нейтронов и ждали с нетерпением экспериментаторы.

И вот 4 июля 1952 года в одной из серий очередных опытов в Институте атомной энергии имени И. Курчатова бездействовавшие до этого момента счетчики нейтронов заработали. Казалось, заветная цель — осуществление управляемой термоядерной реакции — близка. Но ученых ждало жестокое разочарование.

Детальный критический анализ, проведенный самим руководителем работ по управляемому термоядерному синтезу академиком Л. Арцимовичем, показал, что полученные нейтроны не термоядерного происхождения, основная масса дейтонов не успевала прогреться до температуры, позволяющей им вступить в термоядерные реакции синтеза, плазма погибала немного раньше. В чем же дело?

А дело оказалось сложным и очень запутанным.

Плазма — это спаянные электрическими силами легкие электроны и тяжелые атомные ядра. Едва возникнув в разрядной трубке, она благодаря «усилиям» всех своих частиц вытесняет магнитное поле тока из своего объема. А вытесненное поле с силой давит на поверхность плазмы и формирует плазменный жгут. Плазменный жгут не соприкасается со стенкой и как будто может достаточно долго существовать при большой температуре.

Но сдавленная магнитным полем плазма совершенно неустойчива. Малейший изгиб плазменного шнура приводит к тому, что давление магнитного поля в месте изгиба становится еще сильнее, деформация усиливается, шнур теряет форму, и раскаленные частицы расплескиваются по стенкам трубки.

В первой же попытке обуздать раскаленное вещество, находящееся в четвертом состоянии, ученые столкнулись с его коварным характером и потерпели неудачу. Ясно было, что ответ на вопрос: «Возможно ли осуществление управляемой термоядерной реакции?» — можно получить только после исследования свойств самой плазмы.

Так возникла новая наука — физика высокотемпературной плазмы, о которой Л. Арцимович как-то полушутя сказал, что ее не следует причислять к естественным наукам, так как предметом естественных наук являются объекты, созданные природой, а предметом физики плазмы — объекты, созданные экспериментаторами.

Сейчас в лабораториях мира работают больше сотни магнитных «бутылок» — разных типов ловушек для плазмы. Одни из них, например, такие, как американская «Сцилла», похожи на разрядную трубку, где плазму удерживают с помощью дополнительного проводника с током. Однако горячая плазма живет в ней всего лишь несколько миллионных долей секунды.

В других, например, в советской системе с магнитными пробками «Огра», готовая плазма впрыскивается в трубку, у торцов которой создается более сильное поле, чем в центре. Заряженные частицы, как свет от зеркала, отражаются от области сильного магнитного поля, и плазма мечется между магнитными пробками.

В начале 60-х годов сотруднику отдела плазменных исследований Института атомной энергии М. Иоффе впервые удалось продлить жизнь плазмы до десятых долей секунды. Он так удачно расположил дополнительные внешние проводники с током, что плазма перестала пролезать между силовыми линиями и преждевременно гибнуть. Это было крупнейшим достижением. К сожалению, в такой установке выживала только очень разреженная плазма.

А физики твердо знают, какая именно нужна плазма, чтобы добиться цели — получения экономически

выгодных термоядерных реакций. Плазма, состоящая из смеси дейтерия и трития и нагретая до сотни миллионов градусов, должна иметь такое число частиц (n) в одном кубическом сантиметре и такое время жизни (τ) в секундах, чтобы их произведение ($n\tau$) было больше $3 \cdot 10^{14}$.

Пока ни в одном плазменном устройстве из созданных во многих лабораториях разных стран не получена плазма с необходимыми параметрами. Чаще всего было так, что в установках одного типа удавалось только нагреть плазму до очень высокой температуры. А достаточно большого времени удержания плазмы добивались в установках совершенно другого типа.

Физикам предстояло решить сложнейшую задачу — соединить эти рекордные достижения в одном термоядерном реакторе.

— Значит, надо было сконструировать для плазмы какой-то особенный магнитный дом?

— Да. Именно к этому физики и стремились. И както в голову им пришла счастливая мысль — устроить плазму в кольцевом магнитном поле.

— Ну конечно, отличная мысль. Как говорится, «у кольца нет конца», и плазма не найдет из него выхода.

— Она может найти «выход» везде, даже там, где его как будто и нет. Но ученым удалось постепенно «вырастить» в такой ловушке наилучшую по своим параметрам плазму.

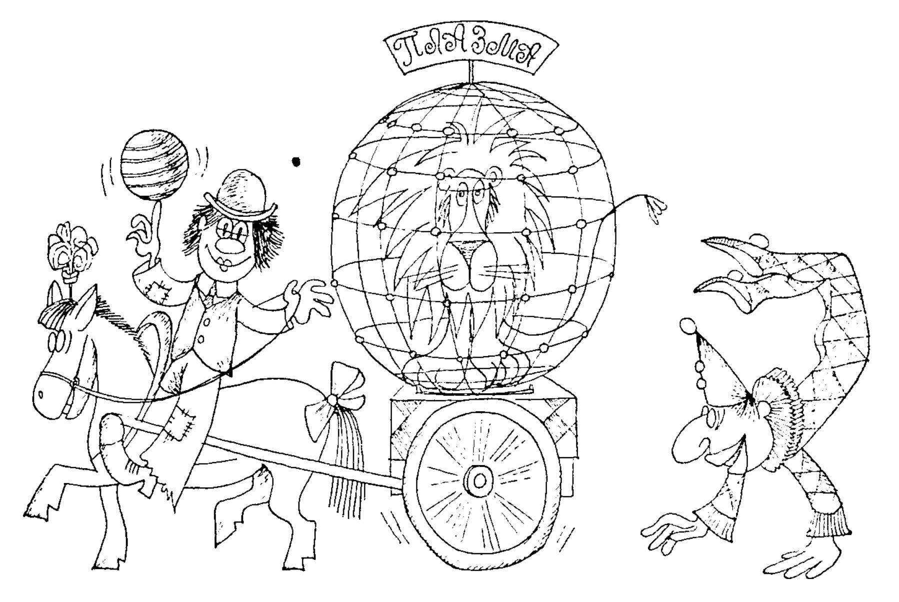
Более 20 лет назад в Институте атомной энергии имени И. Курчатова под руководством академика Л. Арцимовича развернулись исследования плазменных устройств замкнутого типа. В них нет электродов, и плазма как бы замыкается сама на себя.

Эти термоядерные установки — широко известная теперь дружина Токамаков. Их название было составлено из слов, обозначающих основные элементы установки: ток, камера, магнитные катушки — то-ка-ма-к. До последнего времени самым большим из них был Токамак-4, который создавал и удерживал лучшую плазму в мире.

Токамак не бьет по плазме мгновенным электрическим разрядом огромной мощности, не гоняет ее между магнитными пробками. Она свободно растекается в похожей на бублик камере вдоль силовых линий магнитного поля. Металлическая тороидальная камера, на-

полненная газообразным дейтерием, надета на железный сердечник. В таком сочетании она представляет собой вторичную обмотку трансформатора. Ток, возникающий в камере, разогревает газ и превращает его в плазму.

Плазма, отдаленная от стенок сжимающим ее магнитным полем тока, успевает уравновесить его давление своим собственным газовым давлением. Она превращается в кольцо, расположенное вдоль оси камеры. Но сколько времени оно может просуществовать?



Все зависит от того, насколько устойчив плазменный шнур, покоящийся на магнитных силовых линиях. Представьте себе подвешенное на ниточках в горизонтальной плоскости кольцо из очень мягкой резины. Оно деформируется: в тех местах, где укреплены ниточки, образуются перетяжки, а в промежутках между ними кольцо провисает.

Плазменный шнур — это разреженное облачко ионизированного газа, весящее всего лишь несколько десятков микрограммов. Кольцевая камера Токамака не что иное, как вакуумная камера. Газ, заполняющий ее, при атмосферном давлении весит в миллионы раз больше. Можно представить, как легко деформируется это эфемерное облачко плазмы удерживающим его магнитным полем.

В отличие от устойчивой деформации резинового кольца деформация плазмы, однажды возникнув, непременно нарастает: шнур теряет форму, и плазма гибнет на стенках камеры.

Если вставить в мягкое резиновое кольцо упругую стальную проволоку, оно станет более жестким. Роль такой упругой проволоки в плазменном шнуре Токамака выполняют силовые линии продольного магнитного поля, которое создается дополнительной катушкой, намотанной прямо на камеру. Замкнутые силовые линии этого поля имеют форму окружностей, параллельных плазменному шнуру. Они и создают тот магнитный «дом», в котором физики запирают горячую плазму: она лишается свободы, из-за которой раньше гибла.

Продольное магнитное поле так воздействует на частицы, что каждая из них начинает кружиться вокруг его силовой линии и может свободно перемещаться только вдоль нее. Движение поперек камеры законами электродинамики запрещено. Нарушивший этот запрет участок плазмы тащит за собой и силовые линии продольного магнитного поля, которые из-за коллективных свойств плазмы как бы прикреплены к ней. Распрямляясь, упругие силовые линии задержат нарушителя, и нарастание деформации прекратится.

Скорость потери энергии плазмы в советской установке Токамак оказалась в 50—60 раз меньше предрекаемой американским ученым Д. Бомом.

В 1968 году на конференции в Новосибирске Л. Арцимович сказал: «Мы освободились от мрачного призрака громадных потерь, воплощенного в формуле Бома, и открыли путь для дальнейшего повышения температур...»

Это была серьезная победа советской плазменной школы. Потребовалось десять лет кропотливой работы и совместных усилий экспериментаторов и сотрудников теоретического сектора, возглавляемого академиком М. Леонтовичем, для того, чтобы плазма действительно стала чувствовать себя в Токамаке «как дома».

Окруженная двойной магнитной сеткой плазма не оставляла попыток проскочить сквозь нее. Для отдельных заряженных частиц комбинация магнитных полей в Токамаке — идеальная магнитная ловушка. Но для коллектива частиц плазмы это далеко не так. Тут на руку плазме играла даже форма камеры.

Плазма в тороидальной камере представляет собой проводящий виток с током. А каждый уважающий себя виток, находясь в магнитном поле, стремится растянуться, как свернутая стальная пружина. Развертываясь, плазменный шнур может коснуться стенок и погибнуть.

К счастью, с этой бедой Токамак автоматически справляется сам. Ток, текущий по плазме, окружает ее магнитным одеялом. Оно-то и касается стенок раньше плазмы. Силовые линии, пересекая толстую металлическую стенку камеры, наводят в ней ток (так называемый ток Фуко), обратный по направлению току в плазме. А противоположные токи всегда отталкиваются. Поэтому плазменный виток вместо соприкосновения со стенкой отшатывается от нее.

Долго физики пестовали плазму в Токамаке. Из года в год они все сильнее подавляли «микробы» неустойчивости, сокращавшие жизнь горячей плазмы. Упорная борьба с ее болезнями и недомоганиями привела к большому успеху: в Токамаке была выращена практически устойчивая плазма. Но, даже находясь как будто в устойчивом, равновесном состоянии, горячая плазма все равно живет недолго, так как подвержена всякого рода случайностям. Она, если так можно сказать, куда чувствительнее принцессы на горошине. Под магнитной периной в 40 тысяч эрстед она ощущает слабое дополнительное поле даже в десять эрстед, случайно оказавшееся поблизости. Кончается это плохо — возмущенная плазма выходит из состояния равновесия и попадает на стенки камеры.

Беда еще и в том, что плазма все-таки теряет полученную энергию. Между плазмой и стенками камеры — огромный перепад температуры. Несмотря на то, что сама камера тоже горячая, раскаленной до миллионов градусов плазме она кажется ледяной. Подчиняясь закону теплопроводности, горячие частицы плазмы все время стремятся передать энергию холодным стенкам. Заряженные электроны и ядра дейтерия, вращаясь вокруг силовых линий продольного магнитного поля, сталкиваются друг с другом и в результате перескакивают с одной силовой линии на другую. Так почти незаметно для магнитного поля частицы достигают стенок и отдают им немалую часть энергии плазмы.

Плазма, живущая в Токамаке, предъявляет к своему дому очень высокие требования. Он должен быть аб-

солютно чист. Поэтому перед каждым опытом камеру тщательно чистят: долго откачивают воздух при высокой температуре. Но даже считанные атомы тяжелых элементов, застрявшие там, сваливаются со стенок и сильно охлаждают плазму. На таком атоме ворох электронных одежд. Снимая их — ионизируя атом, — плазма опять теряет энергию.

О качестве выращенной плазмы можно судить только после того, как станут известны температура ее ионов и электронов и плотность частиц. Измерить эти величины в веществе, находящемся в четвертом состоянии, очень трудно. Как подобраться к плазме, аккуратно спеленатой двумя магнитными полями, висящей в глубоком вакууме, спрятанной от экспериментаторов в камере с двойными металлическими стенками? Она все время рядом, но существует как будто в другом мире!

И все-таки ученые нашли способы определения числа частиц в камере и измерения их температуры. Оказалось, что температура ионов в Токамаке-3 достигала 400 электрон-вольт (то есть почти 5 миллионов градусов), а электронов — 1000 электрон-вольт. (Эти результаты были подтверждены и в совместном эксперименте английских и советских физиков, в котором с помощью лазеров одновременно измерялась температура электронов и концентрация этих частиц в Токамаке.) При такой температуре некоторая часть ядер дейтерия уже имела энергию, которая давала им возможность вступать в реакцию термоядерного синтеза.

На установке Токамак-3 ученые впервые зарегистрировали длительное термоядерное нейтронное излучение устойчивого плазменного витка. В устройстве, созданном руками человека, затеплился настоящий термоядерный огонек. Плазму такого качества не получали еще ни в какой другой плазменной установке замкнутого типа.

Работа с плазмой напоминает работу терпеливого мастера над каменным кружевом. Изо дня в день искусный резчик по камню добавляет все новые и новые детали. Изо дня в день ученые все улучшают параметры плазмы.

Исследования на Токамаках начались с температуры плазмы около 100 тысяч градусов и с величины главного параметра плазмы — nτ (произведения плотности плазмы на время ее удержания) — около 10^7. К кон-

цу 60-х годов ученым удалось поднять температуру до 5 миллионов градусов, а nτ увеличить в 10 тысяч раз.

О результатах, достигнутых на Токамаке-3, Л. Арцимович рассказывал на III Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Его сообщение вызвало огромный интерес в научном мире. Неожиданно для многих Токамаки опередили все другие плазменные установки и оказались наиболее перспективными. В июне 1969 года Комиссия по атомной энергии США одобрила план создания плазменных установок типа Токамак в лабораториях в Окридже и Принстоне. Сейчас в лабораториях мира действует или строится более 30 крупных Токамаков. Восемь установок находится в Советском Союзе, остальные в США, Англии, Франции, Италии, ФРГ, Австралии, Японии, КНР.

Но цель, которая по-прежнему стоит перед учеными, можно будет считать достигнутой лишь тогда, когда заработает первый промышленный термоядерный реактор.

Останутся ли справедливыми для термоядерных реакторов синтеза выводы, полученные в опытах на сегодняшних Токамаках, работающих пока лишь на физическом термоядерном уровне (реакция идет без получения выигрыша в энергии), — вот что беспокоит физиков, работающих с горячей плазмой. Но решится это только после тщательного исследования плазмы в новых, более мощных установках. Одна из них, Токамак-10, недавно запущена в Советском Союзе.

Руководитель советской термоядерной программы академик Е. Велихов сказал: «Мы должны научиться нагревать плазму до 100 миллионов градусов (сейчас пока пройден десятимиллионный рубеж). Другое условие — плотность плазмы должна быть не менее 100 тысяч миллиардов частиц в кубическом сантиметре, то есть вдвое больше той, что мы сейчас получаем. И самое основное — время удержания плазмы: на Токамаке-10 оно равно 0,01—0,02 секунды, а для полномасштабной термоядерной реакции требуется секунда».

Плотность плазмы в Токамаке-10 будет такой же, как в будущем энергетическом реакторе. Параметр же nτ достигнет только величины 10^{13}, которая в 10—30 раз меньше, чем должна быть в энергетическом реакторе.

Советские ученые создали проект первого демонстра-

ционного реактора с большим диаметром тороидальной камеры, равным 5 метрам, который получил название Токамак-20. В этом, по-видимому последнем, лабораторном прототипе промышленного термоядерного реактора плазма будет нагреваться до 70—100 миллионов градусов.

Параметры и режим работы этой установки уже позволят получить столько энергии от термоядерной реакции, сколько ее будет затрачено на нагрев и удержание плазмы.

С помощью Токамака-20 предстоит решить очень важные физические и технические проблемы. Например, необходимо выяснить, не произойдет ли резкого ухудшения термоизоляции плазмы при температуре около 100 миллионов градусов; необходимо найти новые, более эффективные методы нагрева плазмы.

Если удастся решить все эти сложные задачи, то на принципе Токамаков можно будет создать энергетический термоядерный реактор — электростанцию.

— Если так трудно удерживать разреженную плазму длительное время, то нельзя ли быстро «сжигать» термоядерное топливо, как это происходит при взрыве водородной бомбы?

— В этом случае может разрушиться установка. Ученые нашли более мирный путь, попробовали взрывать маленькие порции ядерного топлива с помощью мощной вспышки когерентного, лазерного света.

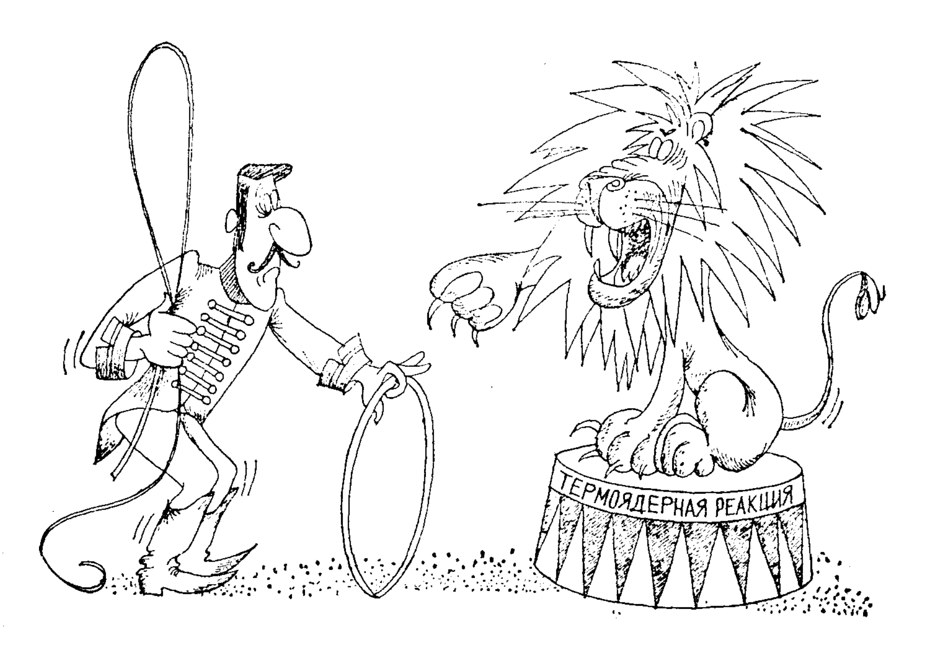
Нет сомнений в том, что «эра синтеза» сменит «эру деления», как только завершится успехом борьба ученых за управляемую термоядерную реакцию. За последние 10 лет выросло и оформилось новое направление, по которому пошли ученые, пытающиеся «приручить» термоядерный огонь. Вскоре после создания оптических лазеров, с помощью которых можно было сосредоточить огромную энергию в небольшой области пространства, возникла идея быстрого зажигания термоядерной реакции синтеза короткими импульсами света лазеров.

Этот путь в принципе ведет к созданию термоядерных реакторов с импульсным режимом работы. Если в Токамаках — установках непрерывного действия — ученые добиваются увеличения времени жизни плазмы, то у специализирующихся во втором направлении совсем иные заботы.

В импульсной термоядерной системе энергия из

каждой порции плазмы извлекается за столь короткое время, что отпадает необходимость бороться с ее неустойчивостью. Физики-лазерщики согласны с О. Уайлдом, который сказал, что «лучший способ избавиться от искушения — это поддаться ему». Они не тратят времени на укрощение плазмы и не пытаются переделать ее природу.

Но предоставленная самой себе плазма жила короткий миг, за который надо успеть поднять ее температуру до 100 миллионов градусов. Это первое неудобство.



Во-вторых, надо как-то поддерживать на необходимом уровне значение параметра плазмы $n\tau$, которое катастрофически быстро снизилось из-за резкого уменьшения τ до 10^{-9} секунды.

Поддавшись искушению — дав плазме полную свободу, физики вынуждены были подтягивать как можно выше второй множитель в главном показателе качества плазмы — плотность.

Величина выделяющейся термоядерной энергии при $n\tau = 10^{14}$ совпадала бы с затратами на нагрев плазмы. Выигрыш в энергии хотя бы в десять раз можно было получить, если еще в десять раз увеличить число частиц в плазме.

Простейший арифметический расчет показывал, что физикам надлежало мгновенно зажечь термоядерные реакции слияния ядер практически в твердом теле, плотность которого около 10^{22} частиц в кубическом сантиметре.

Ничтоже сумняшеся ученые принялись «изготавливать» в лаборатории такую же плотную плазму, какая заполняет сердцевину Солнца, но с температурой в десять раз большей. Но каким же образом?

Плазму с плотностью твердого тела можно было создать единственным способом: разогревая кусочек твердого же вещества. Поэтому мишень, на которую исследователи направили луч лазера, представляла собой что-то вроде таблетки из смеси дейтерия и трития в замороженном, твердом состоянии.

Короткий импульс лазерного света быстро переводил тонкий поверхностный слой вещества в состояние плазмы и нагревал его до высокой температуры. Плазменный сгусток не выдерживал того огромного давления, что возникало в нем из-за высокой температуры и плотности, и разлетался. Происходил небольшой термоядерный взрыв.

Физики находят, что если установки с длительным удержанием плазмы в магнитном поле напоминают паровую машину, то импульсная термоядерная установка подобна двигателю внутреннего сгорания, в котором происходят кратковременные взрывы горючего.

При лазерном термоядерном синтезе твердая мишень весом в десятые или сотые доли грамма — источник микровзрыва, эквивалентного тоннам взрывчатки. Но этот взрыв не представляет опасности ни для здоровья людей, ни для самой термоядерной установки, так как в нем участвует ничтожно малая масса вещества.

В апреле 1968 года в Физическом институте имени П. Н. Лебедева группой ученых под руководством лауреата Нобелевской премии академика Н. Басова впервые были получены нейтроны из плазмы, нагреваемой излучением лазера.

Так была открыта еще одна способность лазера — способность нагревать вещество до температуры, при которой начинается «слипание» ядер дейтерия и трития.

Следующий этап исследований, кстати незавершенный еще и по сей день, посвящен решению важнейшего

вопроса: какой максимальный выигрыш в энергии может дать лазерный термоядерный синтез?

Казалось, что импульсный метод получения термоядерной энергии никаких резервов в себе уже не таил. Время жизни плазмы практически не зависело от конструкции установки. Резерв по плотности тоже как будто был полностью выбран. Физики уже работали с «твердой» плазмой, температуре которой позавидовало бы само Солнце.

И все-таки плотность оставалась тем единственным рычагом, нажимая на который можно было добиться энергетически выигрышных реакций.

Лазерный луч, ударяя по поверхности твердой мишени, нагревает лишь ее поверхностный слой. Большая плотность вещества не дает возможности световому излучению проникнуть на достаточную глубину. Огромная тепловая энергия, которая выделяется на поверхности за счет сильного поглощения света, уносится внутрь мишени только горячими электронами.

Такой метод нагрева не очень-то эффективен. С его помощью можно получить плазму лишь с такими параметрами, которые позволяют только-только свести концы с концами. Добываемая термоядерная энергия никогда не превысит энергии, затраченной на разогрев вещества.

В 1972 году группа американских ученых предложила новую схему лазерного термоядерного синтеза с выигрышем энергии в сотни раз за счет еще большего повышения плотности мишени. По их замыслу, твердый шарик из замороженной смеси дейтерия и трития со всех сторон облучается световыми пучками лазеров. На поверхности сферы должен появиться слой горячей плазмы в виде короны. В перегретой и плотной «короне» должно возникнуть давление до сотен миллиардов атмосфер и разнести плазму во все стороны (и к центру сферы, естественно).

Вот этот «пресс» из быстрых частиц, по идее, и должен уплотнить внутренние области мишени, нагревая их за счет работы сил сжатия. Плазма тотчас приобрела бы плотность, может быть, в сотни раз превышающую плотность твердого тела, и скорость термоядерных реакций при такой плотности резко возросла бы: ядра дейтерия и трития чаще сталкивались бы друг с другом.

Первые эксперименты по сжатию плазмы до сверхплотных состояний были поставлены в Физическом институте имени П. Н. Лебедева. Там под руководством П. Басова в 1970 году была создана уникальная лазерная установка для сферически симметричного облучения мишени. За короткое время, приблизительно равное 10^{-9} секунды, девять лазерных пучков установки обрушивали на твердый шарик диаметром 10^{-2} сантиметра, помещенный в центре вакуумной камеры, энергию в 1000 джоулей. Световые лучи практически одновременно, с точностью до 10^{-10} секунды, сходились в одной точке, создавая плазму и вызывая в ней термоядерную реакцию.

Мгновенный, по сути дела, процесс образования и разлета плазмы ученые анализировали с помощью киноаппарата, только не обычного, а лазерного сверхскоростного с частотой съемки до 1 миллиарда кадров в секунду. Аналогичные термоядерные установки были запущены во Франции и США. Однако проблема лазерного управляемого термоядерного синтеза еще далеко не решена.

В сверхсжатой мишени термоядерные реакции обещают стать энергетически выгодными, если увеличить мощность лазеров до 10^5—10^6 джоулей и выполнить жесткие требования по отношению к форме лазерного импульса.

Но сотрудники ФИАНа и Института прикладной математики АН СССР разработали новую схему термоядерного синтеза. Эта схема дает возможность получать в 1000 раз больше энергии по сравнению с затрачиваемой на создание плазмы и одновременно отменяет особые требования на форму светового лазерного импульса.

Идея заключается в сжатии лучами лазеров не твердых шариков, как это было в предыдущем случае, а мишеней, представляющих собой тонкие сферические оболочки, состоящие из целого набора слоев легких веществ, тяжелых и термоядерного горючего.

Лазеры с импульсами простой формы и с общей мощностью в миллион джоулей сжимают вещество мишени до плотности, почти в 10 раз большей, чем у самого тяжелого химического элемента. Из теоретических оценок следует, что в этих условиях термоядерные реакции синтеза будут энергетически выгодными.

Теперь главная задача заключается в развитии лазерной техники. Ученые работают над созданием крупных лазерных установок, которые позволили бы проверить те новые физические идеи, которые помогут решить проблемы управляемого лазерного синтеза.

После того как в США начались успешные исследования на термоядерных установках непрерывного действия типа Токамак, сотрудники Комиссии по атомной энергии высказали предположение, что демонстрационный действующий термоядерный реактор будет, вероятно, закончен уже в середине 90-х годов.

По мнению американских ученых, работающих в области лазерного термоядерного синтеза, демонстрационный лазерный термоядерный реактор заработает лет через 15, то есть тоже в 90-х годах.

Какой подход к осуществлению термоядерного реактора окажется наиболее реальным, пока неясно. «...Еще неизвестно, — говорил Л. Арцимович, — на какой ветке вырастет золотое яблоко».

В настоящее время исследования лазерного термоядерного синтеза, так же как и осуществление непрерывных реакций слияния ядер в условиях длительного удержания плазмы с помощью магнитного поля, еще не вышли за рамки научно-исследовательских лабораторий. Но решение этих сложных задач не за горами, особенно в условиях тесного международного сотрудничества.

Соглашение между СССР и США, подписанное в Вашингтоне, открывает широкую дорогу такому сотрудничеству, выгодному для обеих сторон. Оно учитывает большое значение проблемы удовлетворения быстро растущих энергетических потребностей США, СССР и других стран мира и предусматривает совместные действия в области управляемого термоядерного синтеза.

— Но пока тепловые электростанции — основной источник энергии; в ближайшие десятилетия атомные реакторы не смогут их заменить; и значит, надо уже сегодня что-то конкретно делать для ликвидации их отрицательного воздействия на среду.

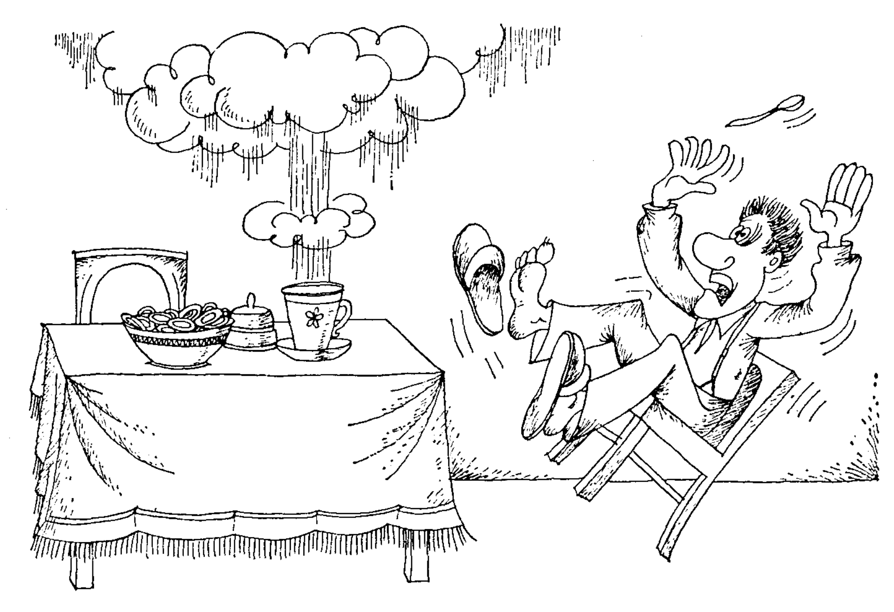
— Конечно, но проблема не только в загрязнениях. Реакция горения лишает нас запасов угля, нефти и газа — ценнейшего на Земле, невосполнимого органического сырья, — и основы нашего существования — кислорода.

— А не будут ли загрязнять среду ядерные и термоядерные установки?

— Ядерное тепло намного чище в экологическом смысле. Радиоактивные отходы можно тщательно собирать и изолировать.

«Эра деления», начало которой было положено запуском первой атомной электростанции, в состоянии будет замедлить развитие глобального загрязнения атмосферы и сберечь ресурсы газа и нефти, важнейшего сырья для химической промышленности.

Установки, использующие реакцию деления ядер урана, тоже, к сожалению, небезотходны. Продукты деления урана содержат долгоживущие радиоактивные изотопы, накопление которых увеличивается пропорционально темпам развития ядерной энергетики. К концу



века количество радиоактивных отходов возрастет в несколько десятков раз. Однако ученые во всем мире работают над радикальным решением проблемы их переработки и надежной консервации.

Отходы производства ядерной энергии представляют опасность для человека, но, применяя особые способы захоронения, радиоактивные вещества удается совершенно изолировать от внешней среды.

Конструкция же самих реакторов деления отработана теперь столь тщательно, что вероятность гибели человека от радиоактивных продуктов при аварии реактора в 10 тысяч раз меньше, чем от удара молнии во время грозы.

«Эра синтеза», которая начнется с вводом в строй первого промышленного термоядерного реактора и завершится полным вытеснением атомных электростанций, навсегда избавит человечество от забот, связанных с решением проблемы энергетики. И самое главное, даст по-настоящему «чистое тепло», не сопровождающееся никакими вредными для человека отходами.

В реакции слияния ядер дейтерия и трития образуются только альфа-частицы и нейтроны, которые и уносят 80 процентов всей выделяющейся энергии. Альфа-частицы — это стабильные ядра химического элемента гелия, не представляющие никакой опасности. А нейтроны должны полностью улавливаться в установке. Плазма со всех сторон будет окружена веществом, хорошо замедляющим и поглощающим нейтроны, которое и соберет в себе всю вырабатываемую реактором энергию.

Во многих вариантах будущих термоядерных установок роль поглотителя нейтронов отводится жидкому литию. Термоядерные нейтроны хорошо тормозятся в литии и повышают его температуру. Поток расплавленного лития из реактора, подобно расплавленной лаве вулкана, доставит ядерное тепло в теплообменник, где и отдаст его воде.

Ядра лития захватывают нейтроны и превращаются в ядра самого тяжелого изотопа водорода — трития. Тритий — единственный радиоактивный продукт, возникающий в процессе передачи энергии реакции синтеза, но в то же время он и участник этой реакции, поэтому его целесообразно снова пустить в дело.

Американские ученые из Окриджа предлагают любопытную схему работы импульсного термоядерного реактора, в котором смесь дейтерия и трития «зажигается» мощным лазерным импульсом. По их идее в металлический сосуд сферической формы диаметром до 5 метров под давлением помещается расплавленный литий, который приводится во вращательное движение. Если быстро размешивать ложечкой в стакане чай, то образуется воронка. При достаточной скорости вращения литиевой «жидкости» тоже образуется воронка, дно которой расположится несколько глубже центра сосуда.

Таблетка замороженной смеси дейтерия и трития сбрасывается в воронку и «поджигается» лазером в тот момент, когда она пролетает через центр. Термоядерный взрыв таблетки за тысячную долю секунды повышает температуру в центре сосуда на несколько сотен градусов. Пары лития и расширяющаяся плазма создают такую ударную волну, которая разорвала бы сосуд, если бы достигла его стенок. Но ее можно значительно ослабить путем введения внутрь жидкого лития большого количества газовых пузырьков, например, через перфорированное кольцо на дне сосуда. Когда ударная волна проходит через такой пузырек, она разбрызгивает жидкость с внутренней его поверхности. Капельки пролетают через пузырек и разбиваются о противоположную стенку. Большая часть их кинетической энергии переходит в тепло. Пройдя через насыщенный пузырьками литий, ударная волна потеряет свою силу и не причинит установке никакого вреда.

В термоядерном контейнере (радиусом больше одного метра) с жидким литием потери нейтронов практически не будет. Вращающаяся литиевая оболочка наглухо «запирает» энергию микровзрывов, повторяющихся приблизительно через каждые 10 секунд.

Подобный термоядерный реактор представляет гораздо меньшую опасность для человека и окружающей среды, чем урановый котел. Радиоактивные ядра трития испускают только бета-лучи (электроны) малой энергии. К тому же нет проблемы захоронения этого вещества. Тритий необходим в самом производстве энергии, и это обеспечивает почти замкнутый цикл. Речь может идти лишь об утечке этого продукта, которую можно сделать совершенно незначительной и даже, как полагают ученые, совершенно избежать загрязнения окружающей среды.

В отличие от ядерных реакторов, которые содержат критическую массу делящегося материала, что заставляет создавать сложную антиаварийную технику, в термоядерных реакторах не может произойти неуправляемого ядерного взрыва (для этого просто недостаточно топлива). Более того, в некоторых реакциях синтеза — например, при слиянии ядер изотопа лития-6 и протонов — образуются только заряженные частицы: ядра изотопов гелия-3 и гелия-4.

Собирая заряженные вторичные частицы на электродах, можно добиться прямого преобразования ядерной энергии в электрическую с КПД до 90 процентов.

Для реакторов, в которых и топливо и «зола» состоят из стабильных ядер, проблемы радиоактивных загрязнений просто не существует. Их можно будет с успехом использовать для установки на транспорте.

Помимо производства электроэнергии, термоядерные реакторы могут оказаться полезными и для других целей.

Струя высокотемпературной плазмы из реактора — «термоядерная горелка» — найдет применение для разложения вещества на атомы с последующим их разделением. Таким путем любые отходы могут быть превращены в полезное для производства сырье.

Создание замкнутых, безотходных циклов производства позволит избежать угрозы экологического кризиса, предотвращая загрязнение окружающей среды и сохраняя в максимальной степени природные ресурсы.

Итак, развитие ядерной физики открыло перед человечеством перспективу получения энергии гораздо более чистым способом — из урана и водорода — элементов, не используемых в других областях производства.

Наука о строении вещества дает реальную основу для будущего мирного сосуществования и взаимодействия природы и человека в сфере жизни.

Наша прекрасная планета должна оставаться вечно голубой, сколько бы поколений людей ни сменяли друг друга.

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ АТОМА К ЯДРУ

ДОМ МОДЕЛЕЙ

ПУТЕШЕСТВИЯ В ГЛУБЬ ЯДРА

ЯДРА ВО ВСЕЛЕННОЙ И У НАС ДОМА

ДЫШИТЕ ГЛУБЖЕ...

ТАЛАНТЛИВЫЙ ПОДРАЖАТЕЛЬ

«ЧИСТОЕ» ТЕПЛО ЯДЕРНЫХ ГЛУБИН

Черногорова В. А.

Ч-49 Беседы об атомном ядре. М., «Молодая гвардия», 1976.

208 с. с ил. (Эврика).

В книге рассказывается о проблемах, связанных с изучением атомного ядра и его строения, о ядерных силах и частях, из которых состоит ядро, и о достижениях советских ученых в атомной энергетике.

Ч $\frac{70302-236}{078(02)-76}$063—76 **530.4**

Вера Александровна Черногорова

БЕСЕДЫ ОБ АТОМНОМ ЯДРЕ

Редакторы **Л. Дорогова, В. Федченко**

Художник **К. Мошкин**

Художественный редактор **А. Косаргин**

Технический редактор **Н. Строева**

Корректоры **К. Пипикова, А. Долидзе**

Сдано в набор 2/IV 1976 г. Подписано к печати 18/VIII 1976 г. А07412. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага № 1. Печ. л. 6,5 (усл. 10,92). Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 100 000 экз. Цена 52 коп. Т. П. 1976 г., № 63. Заказ 438.

Типография ордена Трудового Красного Знамени издательства ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». Адрес издательства и типографии: 103030, Москва, К-30, Сущевская, 21.